

BİDGE Yayınları

Enerji Depolama Teknolojilerinde Son Gelişmeler

Editör: Doç. Dr. Recep Taş

ISBN: 978-625-372-335-4

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 03.12.2024

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



İçindekiler

Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçin İleri Depolama Yöntemleri ...	4
Nilay AKKUŞ TAŞ	4
Süperkapasitörler: Geleceğin Enerji Depolama Teknolojisi.....	35
Recep TAŞ	35
Fotovoltaik Enerji Depolama Teknolojisi.....	62
NİHAL DELİGÖNÜL	62
Enerji Depolaması İçin Metal-Organik Çerçeve	
Tabanlı Malzemeler	78
NİHAL DELİGÖNÜL	78
Katı-Katı Faz Değişim Malzemelerinin Isıl Enerji Depolama	
Uygulamaları.....	97
Gülşah Öner	97

BÖLÜM I

Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçin İleri Depolama Yöntemleri

Nilay AKKUŞ TAŞ¹

Giriş

Yenilenebilir enerji kaynakları, dünya genelinde enerji talebini karşılamak için sürdürülebilir ve çevre dostu bir çözüm sunmaktadır. Güneş, rüzgâr, biyokütle ve hidroelektrik gibi yenilenebilir kaynaklar, enerji üretimi sırasında fosil yakıtlar gibi karbon salınımına yol açmaz ve tükenme riski taşımamalarıyla öne çıkar (Panwar et al., 2011). Bununla birlikte, bu kaynakların doğası gereği süreksiz olmaları, enerjinin üretildiği an ile tüketildiği zaman arasında dengesizlikler yaratır. Örneğin, güneş enerjisi yalnızca gün boyunca üretilebilirken, rüzgâr enerjisi rüzgâr hızı ve yönüne

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Amasya Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Amasya/Türkiye, Orcid: 0009-0004-8644-6659, nilayakkustas@amasya.edu.tr

bağlıdır. Bu süreksizlik, enerji arzında güvenilirliği azaltabileceği gibi, şebeke stabilitesini de olumsuz etkileyebilir (Lund et al., 2016).

Enerji depolama teknolojileri, bu süreksizliği yönetmek ve yenilenebilir enerji kaynaklarının daha yaygın ve etkili bir şekilde kullanılmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir. Depolama sistemleri, enerji üretimi ile tüketimi arasında bir köprü kurarak arz-talep dengesini optimize eder. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştırarak, fosil yakıtların kullanımını azaltma ve enerji güvenliğini artırma hedeflerine katkıda bulunur (Chen et al., 2009).

Enerji depolama sistemleri, enerji sistemlerinin esnekliğini ve verimliliğini artırmak için temel bir bileşen olarak kabul edilir. Bu sistemler, enerji talebi düşük olduğunda üretilen enerjiyi depolayarak, talebin yüksek olduğu zamanlarda kullanıma sunar. Örneğin, güneş enerjisiyle çalışan bir şebekede, gün boyunca üretilen enerji, enerji talebinin arttığı akşam saatlerinde kullanılmak üzere bir batarya sistemi aracılığıyla depolanabilir (Alkafaji et al., 2021).

Ayrıca, enerji depolama teknolojileri, yenilenebilir enerji projelerinde şebeke dışı (off-grid) uygulamalar için kritik bir rol oynar. Özellikle kırsal alanlarda, bu sistemler yerel enerji üretimini desteklerken fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır (Ralon et al., 2017). Diğer bir önemli fayda ise şebeke stabilitesine olan katkılarıdır. Büyük ölçekli enerji depolama sistemleri, şebeke frekansını dengeleme, ani talep artışlarını karşılamak ve enerji iletim hatlarındaki yükü azaltma gibi işlevleri yerine getirir (Zakeri & Syri, 2015).

Son yıllarda, enerji depolama sistemlerinin çevresel etkileri ve maliyetleri de önemli ölçüde iyileşmiştir. Özellikle lityum-iyon bataryalar gibi teknolojiler, maliyetlerinin düşmesi ve enerji yoğunluklarının artması sayesinde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu gelişmeler, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji sistemlerine entegrasyonunu daha ekonomik ve uygulanabilir hale getirmiştir (Schmidt et al., 2017).

1. Enerji Depolama Tekniklerinin Sınıflandırılması

Enerji depolama sistemleri, enerji üretimi ile tüketimi arasındaki süreksizlikleri dengelemek için farklı teknikler kullanır. Bu sistemler, depolama ortamına ve enerjiyi saklama biçimine göre sınıflandırılır. Bu bölümde, kimyasal, elektriksel, mekanik ve termal depolama yöntemleri detaylandırılmaktadır.

1.1. Kimyasal Depolama Yöntemleri

Kimyasal enerji depolama yöntemleri, enerjiyi kimyasal bağlarda saklayarak ihtiyaç duyulduğunda serbest bırakılmasını sağlar. Bu sistemler, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun süreli depolama kabiliyetleriyle öne çıkar.

1.1.1. Bataryalar (Aküler)

Bataryalar, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren ve enerji depolama teknolojileri arasında en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Yenilenebilir enerji sistemlerinde, elektriği depolamak ve arz-talep dengesini yönetmek için kritik bir rol oynarlar. Farklı batarya türleri, enerji yoğunluğu, maliyet, çevrim ömrü ve çevresel etkiler gibi çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Aşağıda, en çok kullanılan batarya türleri ve yenilikçi teknolojiler detaylandırılmaktadır.

Lityum-iyon (Li-iyon) bataryalar, modern enerji depolama teknolojilerinin temelini oluşturmaktadır. Yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve düşük enerji kaybı özellikleriyle öne çıkan bu bataryalar, yenilenebilir enerji sistemlerinden elektrikli araçlara, taşınabilir elektronik cihazlardan şebeke enerji depolama sistemlerine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir (Goodenough & Kim, 2011). Lityum-iyon bataryalar, katotta lityum iyonlarının redüksiyonu ve anotta lityum iyonlarının oksidasyonu ile enerji depolar. Bu süreç, şarj ve deşarj döngüleri sırasında tekrar eder. Araştırmalar, lityum-iyon bataryaların performansını artırmak ve maliyetlerini düşürmek için daha güvenli elektrolitler (ör. katı hal elektrolitler) ve yeni katot malzemeleri geliştirmeye odaklanmaktadır (Manthiram, 2017).

Lityum-sülfür (Li-S) ve lityum-hava (Li-O₂) bataryalar, lityum-iyon bataryalara kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu vaat eden yeni nesil enerji depolama teknolojileridir. Yüksek teorik enerji yoğunluğu (~2600 Wh/kg) ve düşük maliyetli sülfür malzemeleri kullanılması avantajı olarak görülmektedir. Polisülfid çözünmesi ve kısa çevrim ömrü ise dezavantajı olarak görülmektedir. Özellikle uzun mesafeli elektrikli araçlar için cazip bir seçenektir. Bu teknolojiler, henüz ticari olarak yaygınlaşmamış olsa da gelecekte enerji depolama sistemlerinin dönüşümünde önemli bir rol oynayabilir.

Sodyum-iyon (Na-iyon) bataryalar, lityum-iyon bataryalara çevresel olarak daha sürdürülebilir bir alternatif sunar. Lityum yerine sodyum kullanımı, maliyetlerin düşmesine ve madencilik faaliyetlerinin çevresel etkilerinin azalmasına yol açabilir. Lityum-iyon bataryalara benzer şekilde, sodyum iyonları bir elektrotlar

arasında hareket ederek enerji depolar. Avantajları olarak sodyumun bol bulunabilirliği ve düşük maliyeti ile daha çevre dostu üretim süreçleri sıralanabilir. Dezavantajları olarak ise lityum-iyona kıyasla daha düşük enerji yoğunluğu ile daha büyük sodyum iyonları nedeniyle elektrot yapılarında sınırlamalar gösterilebilir. Na-iyon bataryalar, özellikle sabit enerji depolama uygulamalarında kullanılmak üzere geliştirilmektedir. Bu alanda, katot malzemelerinin performansını artırmaya yönelik araştırmalar sürmektedir (Slater et al., 2013).

Akış bataryaları, enerji depolama sistemlerinde ölçeklenebilirliği ve uzun çevrim ömrü ile dikkat çeken bir diğer yenilikçi teknolojidir. Elektrolit çözeltileri, harici depolama tanklarında saklanır ve bir elektrokimyasal hücreden pompalanarak enerji depolama veya geri kazanma işlemi gerçekleştirilir. Kapasitenin, elektrolit tanklarının büyüklüğüne göre kolayca artırılabilmesi, yüz binlerce şarj-deşarj döngüsüne dayanabilen uzun çevrim ömrü ve geleneksel bataryalara kıyasla daha güvenli bir yapıya sahip olması akış bataryalarını diğer bataryalardan üstün kılar. Depolama kapasiteleri lityum-iyon bataryalara göre düşük olması ve karmaşık sistem tasarımı ve yüksek başlangıç maliyetleri akış bataryalarının kullanımını sınırlandırmaktadır. Akış bataryaları arasında vanadyum redoks bataryaları ve çinko-brom bataryaları öne çıkmaktadır. Bu bataryalar, özellikle büyük ölçekli yenilenebilir enerji projelerinde ve şebeke uygulamalarında tercih edilmektedir (Skylas-Kazacos et al., 2016).

Batarya teknolojileri, yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonunda kritik bir rol oynamaktadır. Her bir batarya türü, enerji yoğunluğu, maliyet ve kullanım alanına bağlı olarak farklı

avantajlar ve sınırlamalara sahiptir. Lityum-iyon bataryalar, günümüzde en yaygın kullanılan bataryalar olsa da, sodyum-iyon, lityum-sülfür, lityum-hava ve akış bataryaları gibi yeni nesil teknolojiler, maliyetleri düşürme, çevresel etkileri azaltma ve enerji yoğunluğunu artırma hedefleriyle enerji sektöründe dönüşüm yaratabilir.

1.1.2. Hidrojen Depolama

Elektroliz ve Yakıt Hücreleri: Su elektrolizi yoluyla üretilen hidrojen, uzun süreli enerji depolama ve taşımacılıkta kullanılabilir. Yakıt hücreleri aracılığıyla hidrojen tekrar elektrik enerjisine dönüştürülebilir.

Sıvılaştırılmış ve Sıkıştırılmış Hidrojen: Hidrojenin sıvı ya da gaz formunda depolanması, taşınabilir enerji sistemlerinde yaygın bir yöntemdir.

1.2. Elektriksel Depolama Yöntemleri

Elektrik enerjisi, elektriksel depolama cihazlarında doğrudan saklanabilir. Bu yöntemler genellikle kısa süreli depolama gereksinimlerini karşılamak için tercih edilir. Elektriksel depolama yöntemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve enerji sistemlerinin güvenilirliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının, özellikle rüzgâr ve güneş enerjisinin, doğası gereği değişken ve öngörülemez olması, enerji depolama sistemlerinin gerekliliğini artırmaktadır. Bu bağlamda, elektriksel depolama sistemleri, enerji arzı ve talebi arasındaki dengeyi sağlamak için önemli bir rol oynamaktadır.

1.2.1. Süperkapasitörler ve Ultrakapasitörler

Süperkapasitörler (veya ultrakapasitörler), elektrik enerjisinin elektrostatik yük olarak depolandığı enerji depolama cihazlarıdır. Geleneksel kapasitörlerden temel farkı, enerji yoğunluklarının çok daha yüksek olmasıdır. Bu özellik, kapasitörlerin yapısında kullanılan çift katmanlı elektrot malzemelerden ve bu malzemelerin yüksek yüzey alanına sahip yapılarından kaynaklanır. Süperkapasitörlerde enerji depolama, fiziksel adsorpsiyon ve desorpsiyon yoluyla gerçekleşir; bu nedenle herhangi bir kimyasal reaksiyon içermez (Conway, 2013).

Süperkapasitörlerin yüksek enerji yoğunlukları, aktif karbon, grafen ve karbon nanotüpler gibi malzemelerle artırılabilir. Ayrıca, hızlı şarj ve deşarj özellikleri, düşük iç direnç ve uzun çevrim ömrü gibi avantajlar sağlar. Ancak, enerji depolama kapasiteleri bataryalara kıyasla daha düşüktür, bu da uzun süreli enerji depolama için sınırlayıcı bir faktördür (Wang & Xia, 2013).

Süperkapasitörler, yüksek enerji gereksinimi olan, ancak bu enerjinin kısa sürelerde kullanılması gereken uygulamalarda idealdir. Rüzgâr türbinleri veya güneş panellerinde kısa süreli enerji dalgalanmalarını dengelemek için kullanılır. Süperkapasitörler, ani enerji ihtiyaçlarını karşılayarak sistem kararlılığını artırır (Burke, 2010). Elektrikli araçlarda enerji geri kazanım sistemlerinde fren enerjisinin depolanmasında kullanılır. Hızlı şarj-deşarj kabiliyeti, bu uygulamalar için önemlidir. Elektrik şebekelerinde frekans kontrolü ve voltaj düzenlemesi gibi görevlerde etkili bir çözüm sunar.

Buna rağmen, düşük enerji yoğunlukları ve yüksek maliyetleri, süperkapasitörlerin geniş çaplı enerji depolama sistemlerinde sınırlı

kullanımına yol açmaktadır. Araştırmalar, bu teknolojinin maliyetini düşürmek ve enerji yoğunluğunu artırmak için yeni malzemelerin geliştirilmesine odaklanmaktadır (González et al., 2016).

1.2.2. Süperiletken Manyetik Enerji Depolama (SMES)

Süperiletken Manyetik Enerji Depolama (SMES), enerji depolamak için süperiletken bir bobinin oluşturduğu manyetik alanı kullanır. SMES cihazları, elektrik enerjisini manyetik bir alan olarak saklar ve enerjiyi neredeyse kayıpsız bir şekilde geri kazandırır. Süperiletken malzemeler, sıfır elektriksel dirençle çalıştığından, SMES sistemleri son derece yüksek bir verimliliğe sahiptir (Tixador, 2013). Bir SMES sistemi üç ana bileşenden oluşur. Bunlar;

Süperiletken Bobin: Enerji, bir manyetik alan oluşturmak için burada saklanır.

Soğutma Sistemi: Süperiletken malzemenin kritik sıcaklığın altında çalışmasını sağlamak için sıvı helyum veya sıvı azot gibi kriyojenik soğutucular kullanılır.

Güç Elektroniği: Enerji depolama ve geri dönüşüm süreçlerini kontrol eder.

SMES sistemlerinin hızlı yanıt süresi, şebeke dengesizliklerinin ve ani enerji taleplerinin karşılanmasında büyük bir avantaj sağlar. Ancak, sistem maliyetlerinin yüksek olması ve kriyojenik soğutma gereksinimi, teknolojinin yaygın kullanımını sınırlamaktadır (Wang et al., 2012).

SMES sistemleri milisaniyeler içinde enerji depolayabilir veya enerji aktarabilir. Enerji dönüşüm kayıpları oldukça düşüktür ve

%95-98 arasında bir verimlilik sağlar. Süperiletken malzemelerin yıpranmaması sayesinde cihazın kullanım ömrü uzundur.

Bunların yanı sıra süperiletken malzemeler ve kriyojenik soğutma sistemleri oldukça pahalıdır. Süperiletken malzemelerin çalışabilmesi için düşük sıcaklıkların sürekli olarak korunması gereklidir.

SMES sistemleri, özellikle ani enerji dalgalanmalarının ve kesintilerin kritik olduğu uygulamalarda tercih edilir. Enerji dalgalanmalarının dengeleyici unsuru olarak elektrik şebekelerinde kullanılır. Yüksek hassasiyetli makinelerde enerji kesintilerine karşı bir tampon görevi görür. Parçacık hızlandırıcıları ve nükleer füzyon gibi yüksek enerji gerektiren bilimsel uygulamalarda yer alır (Vulusala G & Madichetty, 2018).

Sonuç olarak, SMES teknolojisi, özellikle yüksek verimlilik ve hızlı enerji dönüşümü gerektiren alanlarda büyük bir potansiyele sahiptir. Ancak maliyet ve karmaşıklık faktörlerinin aşılması, bu teknolojinin daha geniş bir uygulama alanı bulmasını sağlayacaktır.

1.3. Mekanik Depolama Yöntemleri

Mekanik depolama yöntemleri, enerjinin fiziksel olarak depolanması esasına dayanır. Bu yöntemler, genellikle potansiyel enerji veya kinetik enerji biçiminde enerji depolamak için kullanılır. Örneğin, pompalı hidroelektrik depolama sistemleri (PHD), suyun yüksek bir konumdan alçak bir konuma taşınmasıyla potansiyel enerji depolar. Bu sistemler, enerji talebinin yüksek olduğu zamanlarda suyu yukarı pompalayarak depolama yapar ve talebin düşük olduğu zamanlarda suyu serbest bırakarak elektrik üretir (Oymak & Tür, 2022). Bu bağlamda, pompalı hidroelektrik

sistemlerinin avantajları ve dezavantajları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Özellikle, bu sistemlerin büyük ölçekli enerji depolama kapasitesine sahip olması, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır (Oymak & Tür, 2022).

1.3.1. Pompalı Hidroelektrik Depolama (PHD)

Pompalı hidroelektrik depolama (PHD) sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve enerji sürekliliğinin sağlanması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Günümüzde, fosil yakıtların sınırlı rezervleri ve çevresel kirlilik sorunları, ülkeleri yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeye zorlamaktadır. Bu bağlamda, PHD sistemleri, enerji depolama çözümleri arasında önemli bir yer tutmaktadır. Su, enerji fazlası olduğunda yüksek bir rezervuara pompalanır ve ihtiyaç anında bir türbinden geçirilerek elektrik üretimi sağlanır. Büyük ölçekli enerji depolama için ekonomik ve güvenilir bir yöntemdir (Deane et al., 2010). Bu sistemler, özellikle rüzgâr ve güneş enerjisi gibi kesintili enerji kaynaklarının entegrasyonunda büyük avantajlar sunmaktadır.

1.3.2. Basınçlı Hava Enerji Depolama (CAES)

CAES sistemleri, elektrik enerjisini sıkıştırılmış hava şeklinde depolayarak çalışır. Bu sistemler, enerji talebinin yüksek olduğu dönemlerde depolanan havayı serbest bırakarak elektrik üretir. Geleneksel CAES sistemleri, sıkıştırma sürecinde ısı kaybı yaşamakta ve bu nedenle genellikle fosil yakıt kullanımı gerektirmektedir (Zhang et al., 2013). Ancak, gelişmiş adyabatik basınçlı hava enerji depolama (AA-CAES) sistemleri, sıkıştırma sırasında oluşan ısıyı yeniden kullanılmasını sağlayarak verimliliği

artırmaktadır (Guo et al., 2017). Bu sistemler, enerji depolama verimliliğini artırmak için ısıyı depolamakta ve elektrik üretiminde kullanılmaktadır.

CAES sistemlerinin avantajları arasında yüksek kapasite ve uzun süreli depolama imkânı bulunmaktadır. Geleneksel enerji depolama yöntemleri, genellikle belirli coğrafi özelliklere bağlıdır. Örneğin, pompaj hidroelektrik depolama (PHS) sistemleri, uygun yer altı su kaynaklarına ihtiyaç duyar (Wang et al., 2017). CAES sistemleri ise, yer altı depolama alanlarına ihtiyaç duymadan, basınçlı tanklar gibi alternatif depolama yöntemleri kullanarak daha esnek bir yapı sunmaktadır (Kantharaj et al., 2015). Bu durum, CAES sistemlerinin daha geniş bir uygulama alanına sahip olmasını sağlamaktadır.

1.3.3. Volan Enerji Depolama (Flywheel)

Enerji, yüksek hızda dönen bir disk üzerinde saklanır. Diskin yavaşlatılmasıyla enerji geri kazanılır. Yüksek çevrim ömrü ve hızlı yanıt süresi sağlar (Bitterly, 1998). Volan enerji depolama sistemleri, yüksek güç yoğunluğu ve hızlı enerji salınımı özellikleri ile dikkat çekmektedir. Hedlund ve arkadaşları (2015) tarafından yapılan bir incelemede, volanların yüksek güç uygulamalarında süperkapasitörlere benzer işlevsellik gösterdiği belirtilmiştir. Bu çalışmada, volan sistemlerinin otomotiv uygulamalarındaki gelişimi ele alınmış ve bu sistemlerin belirli güç ve enerji değerleri ile optimize edildiği örnekler sunulmuştur (Hedlund et al., 2015). Örneğin, volan sistemlerinin 5.5 kW/kg spesifik güç ve 3.5 Wh/kg spesifik enerji değerlerine ulaştığı ifade edilmiştir. Bu özellikler, volanların enerji depolama sistemleri arasında öne çıkmasını sağlamaktadır. Volan enerji depolama sistemlerinin avantajları

arasında, yüksek verimlilik ve uzun ömür yer almaktadır. Bu sistemler, enerji depolamak için mekanik bir yöntem kullanarak, kimyasal veya elektriksel depolama sistemlerine göre daha az çevresel etki yaratmaktadır. Bilen ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, enerji depolama teknolojilerinin, yenilenebilir enerji üretimine katkı sağladığı ve petrol bazlı yakıtlara alternatif sunduğu vurgulanmıştır. Bu bağlamda, volan enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunda önemli bir rol oynamaktadır (Taşkesen et al.).

1.4. Termal Depolama Yöntemleri

Termal depolama, enerji sistemlerinin etkinliğini artırmak ve enerji arzı ile talebi arasındaki uyumsuzluğu gidermek için kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu açısından, termal depolama sistemleri, enerji verimliliğini artırmak ve çevresel etkileri azaltmak için önemli bir çözüm sunmaktadır. Bu bağlamda, latent ısı depolama (LHTES) sistemleri, yüksek enerji yoğunlukları ve neredeyse sabit sıcaklıklarda enerji depolama kapasitesi ile dikkat çekmektedir (Al-abidi et al., 2013).

1.4.1. Erimiş Tuz Depolama

Erimiş tuz depolama, enerji depolama sistemleri arasında önemli bir yere sahiptir. Bu sistemler, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu açısından kritik bir rol oynamaktadır. Erimiş tuzlar, yüksek enerji depolama yoğunluğu ve uygun maliyetleri ile dikkat çekmektedir. Xie ve arkadaşları (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, tuz hidratlarının yüksek enerji depolama yoğunluğu, rasyonel fiyatları ve iyi termal iletkenlikleri

nedeniyle faz değişim malzemeleri (PCM) olarak kullanılması gerektiği vurgulanmaktadır (Xie et al., 2017). Güneş enerjisi ile ısıtılan erimiş tuzlar, termal enerji depolayarak gece boyunca enerji üretimi sağlar. Yoğun olarak güneş termal enerji santrallerinde kullanılır (Gil et al., 2010).

1.4.2. Faz Değişim Malzemeleri (FDM)

Faz Değişim Malzemeleri (FDM), enerji depolama sistemleri içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu malzemeler, faz geçişi sırasında gizli ısıyı depolama ve serbest bırakma yetenekleri sayesinde, enerji verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Özellikle binalarda ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) sistemlerinin enerji tüketiminin artmasıyla birlikte, FDM'lerin kullanımı giderek daha fazla önem kazanmaktadır. FDM'lerin binalardaki ısı transferine etkisi ve iç mekân konforunu artırmadaki rolleri, bu malzemelerin araştırılmasına yönelik ilginin artmasına neden olmuştur (Khan et al., 2020).

1.4.3. Jeotermal Enerji Depolama

Isı, yeraltı rezervuarlarında depolanarak daha sonra kullanılabilir. Özellikle ısı pompası sistemlerinde kullanılır.

1.4.4. Soğutma Enerjisi Depolama

Buz Depolama Sistemleri: Soğutma yüklerini dengelemek için enerji, buz olarak depolanır. Özellikle ticari ve endüstriyel soğutma sistemlerinde yaygındır.

2. Hidrojen ve Enerji Depolama

Hidrojen, yenilenebilir enerji sistemleri için sürdürülebilir bir enerji taşıyıcısı olarak büyük bir potansiyele sahiptir. Karbon

içermeyen bir enerji taşıyıcısı olması nedeniyle, enerji sistemlerinin dekarbonizasyonunda kritik bir rol oynar. Hidrojenin üretim, depolama ve kullanım süreçleri, enerji sistemlerine entegrasyonunu etkileyen önemli faktörlerdir. Bu bölümde, hidrojenin enerji depolama kapasitesi, üretim ve depolama yöntemleri ile hidrojen ekonomisinin geleceği detaylandırılmaktadır.

Hidrojen, yüksek enerji yoğunluğu ve farklı fiziksel hallerde depolanabilirliği sayesinde enerji depolama teknolojileri arasında dikkat çekmektedir. Hidrojenin enerji yoğunluğu, birim kütle başına diğer fosil yakıtlara göre oldukça yüksektir (142 MJ/kg). Ancak birim hacim başına düşük enerji yoğunluğu, depolama ve taşımacılık zorluklarını beraberinde getirmektedir (Crabtree et al., 2004). Hidrojen, birim kütle başına enerji taşıma kapasitesi bakımından en yüksek değerlere sahiptir. Kimyasal bağlarında enerji sakladığı için uzun vadeli depolama çözümleri sunar. Elektrik üretiminden ulaşım sektörüne kadar birçok alanda enerji taşıyıcısı olarak kullanılabilir. Lakin hidrojen gazının düşük yoğunluğu, sıkıştırma veya sıvılaştırma gereksinimlerini artırır. Hidrojen depolama tanklarının dayanıklılığı ve güvenlik gereklilikleri maliyetleri artırmaktadır. Hidrojenin depolama potansiyeli, yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksizliğini dengelemede önemli bir avantaj sağlar. Güneş veya rüzgâr enerjisinin fazla üretildiği zamanlarda hidrojen üretimi, enerji fazlalığını uzun süreler boyunca saklayabilen bir çözüm olarak öne çıkar (Züttel, 2003). Hidrojen, çeşitli yöntemlerle üretilir ve bu yöntemlerin çevresel etkileri, maliyetleri ve verimlilikleri birbirinden farklıdır. Üretim yöntemleri genellikle "renk kodları" ile sınıflandırılır.

Yeşil Hidrojen: Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak suyun elektrolizi ile üretilir. Karbon emisyonu yoktur ve sürdürülebilir enerji sistemleri için idealdir. Ancak elektroliz cihazlarının (elektrolizörlerin) yüksek maliyeti yaygınlaşmayı sınırlamaktadır (Staffell et al., 2019).

Mavi Hidrojen: Doğal gazın buhar reformasyonu yoluyla üretilir. Ancak bu süreçte açığa çıkan karbon, karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojileri ile saklanır.

Gri Hidrojen: Doğal gaz veya fosil yakıtlardan üretilir. Karbon emisyonu yüksektir ve çevresel sürdürülebilirlik açısından tercih edilmez.

Hidrojen gazı, yüksek basınçlı tanklarda (300-700 bar) depolanır. Bu yöntem düşük maliyetlidir ancak hacimsel enerji yoğunluğu düşüktür. Hidrojen, -253°C'ye kadar soğutularak sıvı hale getirilir. Bu yöntem, yüksek enerji yoğunluğu sağlar ancak sıvılaştırma işlemi sırasında enerji kaybı (%30-40) yaşanır. Hidrojen, metal alaşımlarıyla reaksiyona girerek katı fazda depolanır. Bu yöntem, daha yüksek güvenlik sağlar ancak metallerin ağırlığı enerji yoğunluğunu sınırlayabilir (Schlapbach & Züttel, 2001). Hidrojen, amonyak veya sıvı organik hidrojen taşıyıcıları (LOHC'ler) gibi kimyasal bileşikler içinde depolanır. Bu yöntem, taşımacılık ve uzun süreli depolama için uygundur.

Hidrojen ekonomisi, hidrojenin bir enerji taşıyıcısı olarak fosil yakıtların yerini aldığı bir ekonomik sistem olarak tanımlanır. Hidrojen ekonomisinin geleceği, yenilenebilir enerji kaynaklarının artan entegrasyonu, teknolojik ilerlemeler ve politik destek ile şekillenmektedir. Yakıt hücresi elektrikli araçlar (FCEV'ler), içten

yanmalı motorlu araçlara kıyasla sıfır emisyon avantajı sağlar. Özellikle ağır yük taşımacılığında hidrojen kullanımının artması beklenmektedir. Hidrojen, çelik üretimi ve kimyasal süreçlerde fosil yakıtların yerini alabilir. Hidrojen, enerji depolama sistemleri ve şebeke stabilitesini artırmak için kullanılabilir. Hidrojen üretimi ve depolama teknolojilerinin yüksek maliyetleri, geniş ölçekli uygulamaları sınırlamaktadır. Hidrojen taşıma ve dağıtım ağları henüz yeterince gelişmemiştir. Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, 2050 yılına kadar hidrojen ekonomisinin, küresel enerji sisteminin dekarbonizasyonunda önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Hidrojen teknolojilerinin maliyetlerinin düşmesi ve yenilenebilir enerji kapasitesinin artmasıyla hidrojenin enerji sistemlerinde daha yaygın hale geleceği öngörülmektedir (Rolo et al., 2023).

3. Süperkapasitörler ve Ultrakapasitörler

Süperkapasitörler, enerji depolama alanında son yıllarda büyük bir ilgi görmüştür. Kimyasal reaksiyonlara dayalı bataryalardan farklı olarak, süperkapasitörler elektrostatik enerji depolama mekanizmalarına sahiptir. Bu özellikleri, hızlı şarj ve deşarj yetenekleri ile kısa süreli enerji ihtiyaçlarını karşılamada etkili bir çözüm sunar.

Süperkapasitörler, çift tabaka kapasitansı (EDLC) ve psödo-kapasitans olmak üzere iki temel mekanizmayla enerji depolar. Bu mekanizmalar sayesinde, geleneksel kapasitörlere göre çok daha yüksek enerji yoğunluğu sağlanır.

3.1. Elektrostatik Çift Katman Kapasitansı (EDLC)

Bu mekanizma, elektrostatik kuvvetler aracılığıyla elektrot yüzeyine yakın biriken iyonlar sayesinde enerji depolar. İletken elektrotlar (genellikle aktif karbon, grafen) ve iyonik elektrolit arasındaki ara yüzeyde oluşur. Herhangi bir kimyasal reaksiyon içermez, bu nedenle çevrim ömrü oldukça uzundur.

3.2. Psödo-Kapasitans

Elektrot yüzeyinde meydana gelen hızlı ve geri dönüşümlü redoks reaksiyonları ile enerji depolanır. Geçiş metali oksitleri (ör. RuO_2 , MnO_2) ve bazı iletken polimerler (ör. polianilin) bu mekanizma için uygundur. Psödo-kapasitans, EDLC'ye kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu sağlar.

Süperkapasitörlerin şarj ve deşarj süreleri milisaniyeler ile saniyeler arasında değişir, bu da onları ani enerji dalgalanmalarını dengelemede ideal bir çözüm haline getirir (Conway, 2013).

Süperkapasitörler, yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksiz doğasını dengelemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Çeşitli uygulamalarda enerji depolama çözümleri sunarlar. Rüzgâr Enerjisi Sistemlerinde ani rüzgâr hızı değişimlerini dengelemek ve şebeke kararlılığını artırmak için kullanılır. Türbinlerin ürettiği fazla enerjiyi kısa süreliğine depolayarak enerji dalgalanmalarını düzenler. Güneş Enerjisi Sistemlerinde güneş ışığındaki ani değişimlere (örneğin, bulut geçişleri) hızlı tepki vererek enerji üretimini dengelemek için kullanılır. Güneş panelleri ile enerji invertörleri arasında geçici enerji tamponu olarak görev yapar. Akıllı Şebekelerde şebeke frekans kontrolü ve ani yük taleplerinin karşılanmasında etkili bir çözüm sunar. Süperkapasitörler, yüksek

hızlı enerji aktarımı sağlayarak şebeke stabilitesine katkıda bulunur. Elektrikli araçlarda fren enerjisi geri kazanım sistemlerinde enerji depolar ve aktarır. Tren ve tramvay gibi toplu taşıma araçlarında, duraklama sırasında enerji depolama ve hızlanma sırasında enerji sağlama görevlerini üstlenir (González et al., 2016).

Süperkapasitörlerin milisaniyeler düzeyinde enerji transferi sağlama yeteneği, süperkapasitörlerin anlık enerji ihtiyaçlarında etkili olmasını sağlar. Kimyasal reaksiyonlara dayanmayan çalışma prensibi sayesinde, yüz binlerce şarj-deşarj döngüsüne dayanabilir. Süperkapasitörlerin tasarımı basittir ve mekanik hareketli parçaları bulunmadığından bakım maliyetleri düşüktür. -40°C ile $+70^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklıklarda verimli çalışabilir. Kullanılan malzemeler genellikle geri dönüştürülebilir ve toksik değildir. Bunun yanı sıra süperkapasitörlerin enerji yoğunluğu, lityum-iyon bataryalara kıyasla oldukça düşüktür ($\sim 5\text{-}10\text{ Wh/kg}$). Bu durum, uzun süreli enerji depolama uygulamalarında kullanımını sınırlar. Yüksek kaliteli elektrot malzemelerinin maliyeti, süperkapasitörlerin yaygınlaşmasını engelleyen önemli bir faktördür. Süperkapasitörler, uzun süre boyunca enerji saklama gereksinimlerinde bataryalara kıyasla daha fazla enerji kaybeder. Süperkapasitörlerin düşük enerji yoğunluğu, büyük hacimli uygulamalarda kullanımını zorlaştırır (Burke, 2010).

Süperkapasitörler, hızlı enerji transferi ve uzun çevrim ömrü gerektiren uygulamalarda benzersiz avantajlar sunmaktadır. Yenilenebilir enerji sistemlerindeki rolü, özellikle enerji dalgalanmalarını dengeleme ve kısa süreli enerji ihtiyaçlarını karşılamada önemli bir katkı sağlamaktadır. Ancak düşük enerji yoğunlukları ve yüksek maliyetleri, süperkapasitörlerin uzun süreli

enerji depolama sistemlerinde kullanılmasını sınırlandırmaktadır. Gelecekte, yeni elektrot malzemeleri ve üretim yöntemleri üzerindeki araştırmalar, bu teknolojinin potansiyelini artırmaya devam edecektir.

4. Termal Enerji Depolama Sistemleri

Termal enerji depolama (TED) sistemleri, enerjiyi ısı veya soğuk formunda saklayarak, özellikle yenilenebilir enerji sistemlerinde enerji sürekliliğini sağlamak ve enerji maliyetlerini düşürmek için etkili bir çözüm sunar. TED sistemleri, düşük maliyetli ve çevre dostu enerji depolama teknolojileri arasında yer alır.

4.1. Termal Enerji Depolamanın Prensipleri

Termal enerji depolama, enerji verimliliği ve sürdürülebilir enerji sistemleri açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu sistemler, enerji talebinin yüksek olduğu dönemlerde depolanan enerjinin serbest bırakılmasını sağlayarak, enerji kaynaklarının daha etkin kullanılmasına olanak tanır. Termal enerji depolama sistemleri, genellikle üç ana kategoriye ayrılır: duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal depolama. Gizli ısı depolama sistemleri, faz değişim malzemeleri (FDM) kullanarak enerji depolar ve bu malzemelerin faz geçişi sırasında büyük miktarda enerji depolama kapasitesine sahiptir (Al-Abidi et al., 2012).

4.1.1. Gizli Isı Depolama

Gizli ısı depolama sistemlerinin temel prensiplerinden biri, faz değişim malzemelerinin yüksek ısı kapasiteleridir. Bu malzemeler, belirli bir sıcaklık aralığında faz değiştirirken (katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya geçerken) büyük miktarda enerji depolayabilirler.

Örneğin, Erythritol ($C_4H_{10}O_4$) gibi organik faz değişim malzemeleri, motor egzoz ısını depolamak için kullanıldığında, önemli miktarda enerji geri kazanımı sağlamakta ve sistemin genel verimliliğini artırmaktadır (Johar et al., 2016). Bu tür sistemlerin tasarımında, malzemenin erime süresi ve ısı iletkenliği gibi özellikler büyük önem taşımaktadır. Yapılan çalışmalar, bu özelliklerin enerji depolama ve geri kazanım süreçlerini doğrudan etkilediğini göstermektedir (Dang et al., 2020).

4.1.2. Duyulur Isı Depolama

Duyulur ısı depolama, enerji verimliliği ve sürdürülebilir enerji sistemleri açısından önemli bir konu olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemler, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve enerji talep yönetimi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Duyulur ısı depolama, belirli bir sıcaklık aralığında ısı enerjisinin depolanmasını sağlayarak, enerji arzı ile talebi arasındaki dengesizliği gidermeye yardımcı olur. Bu bağlamda, duyulur ısı depolama sistemlerinin tasarımı ve performansı üzerine yapılan araştırmalar, enerji sistemlerinin etkinliğini artırmak için gereklidir.

Duyulur ısı depolama sistemleri, genellikle düşük maliyetli ve teknik uygulanabilirlik açısından avantajlı olan sistemlerdir. Örneğin, Paksoy ve arkadaşları (Koçak & Paksoy, 2023) tarafından yapılan çalışmada, yüksek sıcaklıktaki endüstriyel uygulamalarda atık bazlı depolama malzemelerinin kullanıldığı duyulur ısı depolama sistemlerinin önemi vurgulanmaktadır. Bu sistemler, güneş enerjisinin verimli bir şekilde depolanmasını ve kullanılmasını sağlayarak, enerji maliyetlerini düşürmekte ve fosil yakıt tüketimini azaltmaktadır.

4.1.3. Termokimyasal Depolama

Enerji, tersinir kimyasal reaksiyonlar yoluyla depolanır. Örneğin, kimyasal bağların kopması veya oluşumu sırasında enerji saklanabilir. Çok yüksek enerji yoğunluğu ve uzun süreli depolama imkânı sunar. Karmaşık sistem tasarımı ve yüksek maliyetise kullanım imkanlarını sınırlandırmaktadır.

Termal enerji depolama sistemleri, sıcaklık farkını koruyarak veya faz değişimlerini yöneterek enerji talep dengesizliklerini çözmek için ideal bir yöntemdir (Cabeza, 2021).

4.2. Erimiş Tuz Teknolojisi

Erimiş tuz teknolojisi, güneş enerjisi santrallerinde (özellikle yoğunlaştırılmış güneş enerjisi – CSP) en yaygın kullanılan termal enerji depolama yöntemlerinden biridir. Enerji, güneş ışığından elde edilen ısı kullanılarak erimiş tuzlarda saklanır. Erimiş tuzlar (genellikle sodyum nitrat ve potasyum nitrat karışımı), yüksek sıcaklıklarda ($\sim 290\text{--}565^{\circ}\text{C}$) ısı depolar. Depolanan enerji, gece veya bulutlu havalarda türbinlerin çalıştırılması için buhar üretiminde kullanılır. Erimiş tuz, duyulur ısı depolama için yüksek enerji yoğunluğu sağlar. Sıcaklık stabilitesi sayesinde enerji kayıpları minimum düzeydedir. Büyük ölçekli uygulamalarda düşük maliyetlidir. Yüksek sıcaklıklar ve tuzun kimyasal özellikleri, depolama tanklarında korozyona yol açabilir. Erimiş tuz sistemleri, yüksek başlangıç yatırımları gerektirir.

Erimiş tuz teknolojisi, özellikle 24 saat enerji üretimi sağlayabilen güneş termal enerji santrallerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknoloji, İspanya'daki Gemasolar ve

ABD'deki Crescent Dunes gibi projelerde başarıyla uygulanmıştır (Gil et al., 2010).

4.3. Jeotermal ve Solar Isı Depolama Yöntemleri

Jeotermal ve solar termal enerji, çevre dostu ve sürdürülebilir enerji kaynakları olarak, termal enerji depolama sistemleriyle birlikte kullanılmaktadır.

Jeotermal enerji, yeraltındaki sıcak su rezervuarları veya kaya formasyonları içinde saklanır. Özellikle ısı pompaları ile, yaz aylarında depolanan ısı, kış aylarında kullanılabilir. Uzun süreli depolama ve yerel enerji kaynağı kullanımı imkânı sağlar. Bunun yanı sıra jeolojik yapıların uygunluğu ve yüksek sondaj maliyetleri kullanımını sınırlandırmaktadır.

Güneş enerji santralleri, güneş ışığından elde edilen ısıyı erimiş tuz veya diğer termal depolama sistemleriyle birleştirerek enerji sürekliliğini sağlar. Güneş enerjisi kolektörleriyle elde edilen sıcak su, termal depolama tanklarında saklanarak sıcak su ihtiyacını karşılar.

Faz Değişim Malzemeleri (PCM), ısı depolamada verimliliği artırmak için kullanılır. Örneğin, parafin, organik bileşikler ve tuz hidratları. Doğal yeraltı suyu veya kaya formasyonlarında uzun süreli ısı saklanabilir.

Jeotermal ve solar termal enerji depolama sistemleri, enerji sürekliliği ve mevsimsel enerji dengesini sağlamada önemli bir katkı sunar. Özellikle bölgesel ısıtma sistemleri ve endüstriyel uygulamalarda bu yöntemlerin kullanım potansiyeli yüksektir (Din & Rosen, 2011).

Termal enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksiz doğasına karşı etkili bir çözüm sunar. Erimiş tuz teknolojisi, güneş termal santrallerinde sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak kendini kanıtlamıştır. Jeotermal ve solar ısı depolama yöntemleri ise hem yerel enerji kaynaklarının değerlendirilmesinde hem de çevresel etkilerin azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu teknolojilerin gelişimi, enerji sistemlerinde daha geniş ölçekli uygulamalar için önemli fırsatlar sunmaktadır.

Sonuç

Enerji depolama teknolojileri, sürdürülebilir enerji sistemlerinin başarısında kritik bir rol oynamaktadır. Gelecekte bu teknolojilerin gelişimi, yenilikçi çözümler, etkili politikalar ve ileri araştırmalarla desteklenecektir. Yeni nesil batarya teknolojileri arasında katı hal bataryalar, lityum-sülfür ve lityum-hava bataryalar gibi yüksek enerji yoğunluğu ve güvenlik avantajları sunan seçenekler ön plandadır (Liu et al., 2022). Sodyum-iyon ve magnezyum-iyon bataryalar gibi düşük maliyetli alternatifler de enerji depolamayı daha erişilebilir hale getirecektir (Shahzad & Jasińska, 2024). Hibrit enerji depolama sistemleri, hızlı tepki süresi ve yüksek enerji yoğunluğu sunarak farklı depolama teknolojilerinin bir arada kullanılmasını sağlayacaktır. Yapay zekâ ve nesnelerin interneti (IoT) tabanlı çözümler, enerji depolama sistemlerinin yönetimi ve performans optimizasyonunda önemli rol oynayacaktır (Staffell et al., 2019). Yeşil hidrojen üretimi ve depolama sistemlerinin ilerlemesi, uzun süreli enerji depolama ve karbon nötr enerji sistemleri için büyük bir potansiyele sahiptir. Enerji depolama teknolojilerinin benimsenmesi, güçlü politikalar ve teşviklerle desteklenmelidir. Ar-Ge yatırımları, düşük maliyetli, güvenli ve

evre dostu enerji depolama çözümlerinin geliştirilmesini sağlayacaktır. Standartlar ve düzenlemeler, bu teknolojilerin güvenliği, dayanıklılığı ve geri dönüştürülebilirliği için kritik önem taşır. Araştırma alanlarında yeni malzeme geliştirme, termokimyasal enerji depolama, yapay zeka uygulamaları ve hidrojen teknolojilerine odaklanılmaktadır (Mathis et al., 2019). Gelecekte bu yenilikler, enerji yoğunluğunu artırarak, maliyetleri düşürerek ve çevresel etkileri azaltarak daha sürdürülebilir bir enerji geleceği sunacaktır.

Kaynakça

Al-Abidi, A. A., Bin Mat, S., Sopian, K., Sulaiman, M. Y., Lim, C. H., & Th, A. (2012). Review of thermal energy storage for air conditioning systems. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5802-5819. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.030>

Al-abidi, A. A., Bin Mat, S., Sopian, K., Sulaiman, M. Y., & Mohammed, A. T. (2013). CFD applications for latent heat thermal energy storage: a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 20, 353-363. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.079>

Alkafaji, A. S., Al-Samawi, A. A., & Trabelsi, H. (2021). Hybrid Energy Storage Review for Renewable Energy System Technologies and Applications. 2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (Ssd), 1059-1067. <https://doi.org/10.1109/Ssd52085.2021.9429424>

Bitterly, J. G. (1998). Flywheel technology - Past, present, and 21st century projections. *Ieee Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 13(8), 13-16. <https://doi.org/Doi 10.1109/62.707557>

Burke, A. (2010). Ultracapacitor technologies and application in hybrid and electric vehicles. *International Journal of Energy Research*, 34(2), 133-151. <https://doi.org/10.1002/er.1654>

Cabeza, L. F. (2021). Advances in thermal energy storage systems: Methods and applications. In *Advances in thermal energy storage systems* (pp. 37-54). Elsevier.

Chen, H. S., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C. Q., Li, Y. L., & Ding, Y. L. (2009). Progress in electrical energy storage system: A

critical review. *Progress in Natural Science-Materials International*, 19(3), 291-312. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>

Conway, B. E. (2013). *Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications*. Springer Science & Business Media.

Crabtree, G. W., Dresselhaus, M. S., & Buchanan, M. V. (2004). The hydrogen economy. *Physics Today*, 57(12), 39-44. <https://doi.org/Doi 10.1063/1.1878333>

Dang, S. N., Xue, H. J., Zhang, X. Y., & Zhong, C. W. (2020). Analysis of Heat and Mass Transfer Mechanism during Thermal Energy Storage and Temperature Regulation. *Thermal Science*, 24(5), 3185-3193. <https://doi.org/10.2298/Tsci191116109d>

Deane, J. P., Gallachóir, B. P. O., & McKeogh, E. J. (2010). Techno-economic review of existing and new pumped hydro energy storage plant. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 14(4), 1293-1302. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.015>

Din, I., & Rosen, M. A. (2011). *Thermal energy storage: systems and applications*. John Wiley & Sons.

Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., & Cabeza, L. F. (2010). State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1- Concepts, materials and modellization. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 31-55. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.035>

González, A., Goikolea, E., Barrena, J. A., & Mysyk, R. (2016). Review on supercapacitors: Technologies and materials.

Renewable & Sustainable Energy Reviews, 58, 1189-1206.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.249>

Goodenough, J. B., & Kim, Y. (2011). Challenges for rechargeable batteries. *Journal of Power Sources*, 196(16), 6688-6694. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.074>

Guo, C. B., Zhang, K. N., Pan, L. H., Cai, Z. S., Li, C., & Li, Y. (2017). Numerical investigation of a joint approach to thermal energy storage and compressed air energy storage in aquifers. *Applied Energy*, 203, 948-958.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.030>

Hedlund, M., Lundin, J., de Santiago, J., Abrahamsson, J., & Bernhoff, H. (2015). Flywheel Energy Storage for Automotive Applications. *Energies*, 8(10), 10636-10663.
<https://doi.org/10.3390/en81010636>

Johar, D. K., Sharma, D., Soni, S. L., Gupta, P. K., & Goyal, R. (2016). Experimental investigation on latent heat thermal energy storage system for stationary CI engine exhaust. *Applied Thermal Engineering*, 104, 64-73.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.060>

Kantharaj, B., Garvey, S., & Pimm, A. (2015). Compressed air energy storage with liquid air capacity extension. *Applied Energy*, 157, 152-164. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.076>

Khan, R. J., Bhuiyan, M. Z. H., & Ahmed, D. H. (2020). Investigation of heat transfer of a building wall in the presence of phase change material (PCM). *Energy and Built Environment*, 1(2), 199-206.

Koçak, B., & Paksoy, H. (2023). Endüstride Güneş Enerjisi Uygulamaları İçin Yüksek Sıcaklıkta Termal Enerji Depolama. 15. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi

Liu, W., Placke, T., & Chau, K. (2022). Overview of batteries and battery management for electric vehicles. *Energy Reports*, 8, 4058-4084.

Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., Ridjan, I., Mathiesen, B. V., Hvelplund, F., Thellufsen, J. Z., & Sorknæs, P. (2016). Energy Storage and Smart Energy Systems. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 11(0), 3-14. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.2016.11.2>

Manthiram, A. (2017). An Outlook on Lithium Ion Battery Technology. *Acs Central Science*, 3(10), 1063-1069. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.7b00288>

Mathis, T. S., Kurra, N., Wang, X., Pinto, D., Simon, P., & Gogotsi, Y. (2019). Energy storage data reporting in perspective—guidelines for interpreting the performance of electrochemical energy storage systems. *Advanced Energy Materials*, 9(39), 1902007.

Oymak, A., & Tür, M. R. (2022). An Evaluation of Pumped Hydroelectric Storage Systems. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 6(2), 205-214.

Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1513-1524. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.037>

Ralon, P., Taylor, M., Ilas, A., Diaz-Bone, H., & Kairies, K. (2017). Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030. International Renewable Energy Agency: Abu Dhabi, United Arab Emirates, 164.

Rolo, I., Costa, V. A., & Brito, F. P. (2023). Hydrogen-Based Energy Systems: Current Technology Development Status, Opportunities and Challenges. *Energies*, 17(1), 180.

Schlapbach, L., & Züttel, A. (2001). Hydrogen-storage materials for mobile applications. *Nature*, 414(6861), 353-358. <https://doi.org/Doi.10.1038/35104634>

Schmidt, O., Hawkes, A., Gambhir, A., & Staffell, I. (2017). The future cost of electrical energy storage based on experience rates. *Nature Energy*, 2(8). <https://doi.org/ARTN1711010.1038/nenergy.2017.110>

Shahzad, S., & Jasińska, E. (2024). Renewable revolution: A review of strategic flexibility in future power systems. *Sustainability*, 16(13), 5454.

Skyllas-Kazacos, M., Cao, L., Kazacos, M., Kausar, N., & Mousa, A. (2016). Vanadium electrolyte studies for the vanadium redox battery—a review. *ChemSusChem*, 9(13), 1521-1543.

Slater, M. D., Kim, D., Lee, E., & Johnson, C. S. (2013). Sodium-Ion Batteries. *Advanced Functional Materials*, 23(8), 947-958. <https://doi.org/10.1002/adfm.201200691>

Staffell, I., Scamman, D., Abad, A. V., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., Shah, N., & Ward, K. R. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy &*

Environmental Science, 12(2), 463-491.
<https://doi.org/10.1039/c8ee01157e>

Taşkesen, E., Alahmad, H., & Bilen, E. N. GELECEĞİN ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ. Mühendis ve Makina, 65(714), 1-26.

Tixador, P. (2013). Superconducting magnetic energy storage (SMES) systems. In Electricity transmission, distribution and storage systems (pp. 442-477). Elsevier.

Vulusala G, V. S., & Madichetty, S. (2018). Application of superconducting magnetic energy storage in electrical power and energy systems: a review. International Journal of Energy Research, 42(2), 358-368.

Wang, J. D., Lu, K. P., Ma, L., Wang, J. H., Dooner, M., Miao, S. H., Li, J., & Wang, D. (2017). Overview of Compressed Air Energy Storage and Technology Development. Energies, 10(7). <https://doi.org/ARTN 99110.3390/en10070991>

Wang, Q. S., Ping, P., Zhao, X. J., Chu, G. Q., Sun, J. H., & Chen, C. H. (2012). Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. Journal of Power Sources, 208, 210-224. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.038>

Wang, Y. G., & Xia, Y. Y. (2013). Recent Progress in Supercapacitors: From Materials Design to System Construction. Advanced Materials, 25(37), 5336-5342. <https://doi.org/10.1002/adma.201301932>

Xie, N., Huang, Z. W., Luo, Z. G., Gao, X. N., Fang, Y. T., & Zhang, Z. G. (2017). Inorganic Salt Hydrate for Thermal Energy Storage. *Applied Sciences-Basel*, 7(12). <https://doi.org/ARTN131710.3390/app7121317>

Zakeri, B., & Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 42, 569-596. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.011>

Zhang, Y., Yang, K., Li, X. M., & Xu, J. Z. (2013). The thermodynamic effect of thermal energy storage on compressed air energy storage system. *Renewable Energy*, 50, 227-235. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.052>

Züttel, A. (2003). Materials for hydrogen storage. *Materials today*, 6(9), 24-33.

BÖLÜM II

Süperkapasitörler: Geleceğin Enerji Depolama Teknolojisi

Recep TAŞ¹

Giriş

Süperkapasitörler, enerji depolama sistemleri arasında önemli bir yere sahip olan elektro-kimyasal enerji depolama cihazlarıdır. Yüksek güç yoğunluğu, hızlı şarj ve deşarj yetenekleri ile uzun döngü ömrü gibi özellikleri sayesinde, günümüzde birçok uygulamada tercih edilmektedirler. Süperkapasitörler, geleneksel kapasitörlerden farklı olarak, enerji depolama mekanizmaları açısından daha karmaşık bir yapıya sahiptir. "Süperkapasitörler, enerji depolama ve hasat sorunları için çok sayıda yeni ortaya çıkan mobil cihaz için oldukça caziptir" (Najib, 2020). Bu özellikleri, onları özellikle elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji sistemleri

¹ Doç. Dr., Bartın Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoteknoloji Bölümü, Bartın/Türkiye, Orcid: 0000-0002-3743-7770, rtas@bartin.edu.tr

gibi uygulamalarda vazgeçilmez kılmaktadır. Süperkapasitörlerin yüksek enerji kapasitesi ve güvenilir enerji sağlama yetenekleri, bilim insanlarının bu alanda daha fazla araştırma yapmasına neden olmuştur (Adedoja et al., 2023).

Süperkapasitörlerin tarihsel gelişimi, 1950'li yıllara kadar uzanmaktadır. İlk olarak, elektro-kimyasal çift katman kapasitörleri (EDLC) olarak tanımlanan bu cihazlar, zamanla daha gelişmiş formlara evrilmiştir. Günümüzde, süperkapasitörler, farklı elektrot malzemeleri ve üretim yöntemleri kullanılarak tasarlanmaktadır. Örneğin, "metal oksitler, özellikle ZnO, burada odaklanmaktadır" (Najib, 2020). Bu tür malzemelerin kullanımı, süperkapasitörlerin performansını artırmakta ve yeni uygulama alanlarının ortaya çıkmasına olanak tanımaktadır.

Süperkapasitörlerin önemi, enerji depolama sistemleri içindeki rolüyle de ilişkilidir. Güneş enerjisi gibi kesintili enerji kaynaklarının entegrasyonu, enerji depolama sistemlerinin gerekliliğini artırmaktadır. "Fotovoltaik enerji, kesintili ve dalgalı güç çıkışı ile sınırlıdır; bu nedenle enerji depolama, üretilen gücün depolanarak ihtiyaç duyulduğunda kullanılmasını sağlar" (İbrahim et al., 2021). Bu bağlamda, süperkapasitörlerin fotovoltaik panellerle entegrasyonu, sistem tasarımını basitleştirmekte ve maliyetleri azaltmaktadır.

Süperkapasitörlerin gelişimi, nanomalzemelerin kullanımıyla da hız kazanmıştır. "Multidimensional Nanomaterials for Supercapacitors: Next Generation Energy Storage" adlı çalışmada, süperkapasitör uygulamaları için çok boyutlu nanomalzemelerin keskin gelişmeleri ele alınmaktadır (Verma et al., 2024). Bu tür

malzemeler, süperkapasitörlerin enerji depolama kapasitelerini artırmakta ve yeni tasarım teknikleri sunmaktadır. Örneğin, baskı teknolojisi ile üretilen nanomalzemeler, yüksek performanslı süperkapasitörlerin imalatında önemli bir rol oynamaktadır (Sun et al., 2018). Süperkapasitörlerin sağlık durumu (SOH) tahmini, bu sistemlerin güvenilirliğini artırmak için kritik bir öneme sahiptir. "Süperkapasitörlerin güvenilir çalışması, sistem tasarımı ve optimizasyonu sırasında ömür tahmininin doğru bir şekilde yapılmasını gerektirir" (Vakrilov & Kafadarova, 2022). Bu nedenle, süperkapasitörlerin sağlık durumu tahmin yöntemleri üzerine yapılan araştırmalar, bu alandaki gelişmelerin yönünü belirlemektedir.

1. Süperkapasitörlerin Çalışma Prensipleri

Süperkapasitörler, enerji depolama sistemleri arasında önemli bir yere sahip olup, yüksek güç yoğunluğu ve hızlı şarj-deşarj özellikleri ile dikkat çekmektedir. Geleneksel pillerle karşılaştırıldığında, süperkapasitörler daha uzun ömür ve daha yüksek döngü sayısı sunarak, modern enerji ihtiyaçlarını karşılamak için ideal bir çözüm sunmaktadır. Bu çalışma, süperkapasitörlerin çalışma prensiplerini, elektrostatik depolama mekanizmalarını, çift tabaka kapasitansını ve pseudokapasitansı incelemeyi amaçlamaktadır.

Süperkapasitörlerin temel çalışma prensibi, elektrostatik depolama mekanizmalarına dayanmaktadır. Bu mekanizmada, elektrot yüzeyinde elektrik yüklerinin birikmesiyle oluşan çift tabaka kapasitansı önemli bir rol oynamaktadır. Godse ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, elektrostatik çift tabaka kapasitansının, elektrot malzemesinin yüzey alanı ve iç yapısıyla

doğrudan ilişkili olduğu vurgulanmaktadır. Yüksek yüzey alanına sahip elektrotlar, daha fazla yük depolama kapasitesine sahip olabilmekte ve bu da süperkapasitörlerin genel performansını artırmaktadır. Bu bağlamda, elektrot malzemelerinin geliştirilmesi, süperkapasitörlerin verimliliğini artırmak için kritik bir araştırma alanı haline gelmiştir (Godse et al., 2013).

Elektrostatik depolama mekanizmaları, süperkapasitörlerin enerji depolama yeteneklerini belirleyen temel unsurlardan biridir. Polat tarafından yapılan araştırmada, süperkapasitörlerin hızlı şarj-deşarj özelliklerinin, elektrot malzemelerinin yapısına bağlı olduğu belirtilmektedir. Özellikle, nanoyapılı geçiş metal oksitleri ve iletken polimerlerin kullanımı, yüksek kapasitans değerleri elde edilmesine olanak tanımaktadır. Bu tür malzemeler, elektrot yüzeyinde geniş bir elektroaktif alan oluşturarak, elektrolit iyonlarının hızlı bir şekilde taşınmasını sağlar. Bu durum, süperkapasitörlerin enerji depolama mekanizmalarının etkinliğini artırmaktadır (Polat, 2019).

Çift tabaka kapasitansı, süperkapasitörlerin temel özelliklerinden biri olup, elektrot yüzeyinde oluşan elektrik yüklerinin birikmesiyle meydana gelir. Bu mekanizma, elektrot ve elektrolit arasındaki etkileşimi artırarak, enerji depolama kapasitesini yükseltir. Kara ve Emeksiz tarafından yapılan çalışmada, enerji depolama teknolojilerinin önemine vurgu yapılmakta ve bu teknolojilerin, yenilenebilir enerji sistemlerinin etkinliğini artırmada kritik bir rol oynadığı ifade edilmektedir. Çift tabaka kapasitansı, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı sırasında, enerji talebinin karşılanmasında önemli bir avantaj sağlamaktadır (Emeksiz & Kara, 2022).

Pseudokapasitans ise, süperkapasitörlerin enerji depolama mekanizmalarındaki bir diğer önemli bileşendir. Bu mekanizma, elektrot malzemesinin kimyasal özellikleri ve elektrolit ile etkileşimi sonucunda ortaya çıkar. Polat çalışmasında, pseudokapasitansın, elektrot malzemesinin yapısına ve elektrolit ortamına bağlı olarak değiştiği belirtilmektedir (Emeksiz & Kara, 2022). Özellikle, polipirrol (PPy) gibi iletken polimerlerin kullanımı, pseudokapasitansın artırılmasında etkili olmaktadır. Bu tür malzemeler, elektrot yüzeyinde daha fazla elektroaktif alan oluşturarak, enerji depolama kapasitesini artırmaktadır.

2. Malzeme Bilimi Perspektifinden Süperkapasitörler

Süperkapasitörlerin performansı, kullanılan elektrot malzemeleri ve elektrolit seçenekleri ile doğrudan ilişkilidir. Malzeme bilimi perspektifinden bakıldığında, süperkapasitörlerin geliştirilmesinde karbon bazlı malzemeler, metal oksitler ve polimerler gibi çeşitli elektrot malzemeleri ile sulu, organik ve katı hal elektrolitleri gibi farklı elektrolit seçenekleri önemli rol oynamaktadır.

Karbon bazlı malzemeler, süperkapasitörlerin elektrotları için en yaygın kullanılan malzemelerdir. Bu malzemeler, yüksek yüzey alanı ve iyi elektrik iletkenliği özellikleri sayesinde, enerji depolama kapasitesini artırma potansiyeline sahiptir. Örneğin, Lian ve arkadaşları (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, biyokütle kaynaklı karbon elektrotların kullanıldığı katı, ince ve esnek süperkapasitörlerin performansı incelenmiştir. Çalışmada, chitosan bazlı aktif karbonun, sıvı elektrolitlerle karşılaştırıldığında benzer kapasitif davranış sergilediği gösterilmiştir (Lian et al., 2018). Bu durum, karbon bazlı elektrotların, polimer elektrolitlerle etkileşimde

bulunarak yüksek performans sergileyebileceğini ortaya koymaktadır.

Metal oksitler de süperkapasitörlerde önemli bir rol oynamaktadır. Bu malzemeler, yüksek redoks aktivitesi sayesinde faradik yük depolama kapasitesine sahiptir. Sundriyal ve arkadaşları (2022) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, neem yapraklarından elde edilen aktif karbon ve metal-organik çerçeve (MOF) türevi metal oksitlerin kullanıldığı hibrid süperkapasitörler incelenmiştir. Çalışmada, bu hibrid yapıların, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun döngü ömrü sağladığı belirtilmiştir (Sundriyal et al., 2022). Metal oksitlerin, karbon bazlı malzemelerle birleştirilmesi, süperkapasitörlerin performansını artırma potansiyelini göstermektedir.

Elektrolit seçenekleri de süperkapasitörlerin performansını etkileyen kritik bir faktördür. Sulu elektrolitler, genellikle düşük maliyetli ve çevre dostu olmaları nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak, organik elektrolitler, daha geniş bir elektrokimyasal pencere sunarak daha yüksek enerji yoğunluğu sağlamaktadır. Pacheco ve arkadaşları (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, hidrojel bazlı elektrolitlerin, karbon nanotüplerle birleştirilerek enerji ve güç yoğunluğunun artırıldığı gösterilmiştir (Pacheco et al., 2020). Bu çalışma, organik elektrolitlerin çevre dostu alternatiflerle birleştirilerek performanslarının artırılabilirliğini ortaya koymaktadır.

Katı hal elektrolitleri, sıvı elektrolitlerin güvenlik sorunlarını aşmak için önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Liu ve Li (2022) tarafından yapılan bir incelemede, katı hal elektrolitlerinin,

yüksek enerji yoğunluğu ve güvenlik sağlama potansiyeli ile elektrikli araçlar için gelecek vaat eden bir güç kaynağı olarak değerlendirildiği belirtilmiştir (Liu & Li, 2022). Katı hal elektrolitlerinin, süperkapasitörlerde kullanılmasının, cihazların genel performansını artırabileceği ve güvenliğini artırabileceği vurgulanmaktadır.

3. Performans Parametreleri

Süperkapasitörler, yüksek enerji ve güç yoğunluğu, uzun döngü ömrü ve hızlı şarj/deşarj yetenekleri ile dikkat çeken enerji depolama cihazlarıdır. Bu cihazlar, özellikle elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji sistemleri ve endüstriyel uygulamalar gibi birçok alanda önemli bir rol oynamaktadır. Süperkapasitörlerin performans parametreleri, enerji ve güç yoğunluğu, döngü ömrü ve güvenilirlik, şarj/deşarj hızları gibi unsurları içerir.

3.1. Enerji ve Güç Yoğunluğu

Enerji ve güç yoğunluğu, süperkapasitörlerin en kritik performans parametrelerinden biridir. Enerji yoğunluğu, birim kütle başına depolanan enerji miktarını ifade ederken, güç yoğunluğu, birim kütle başına sağlanan güç miktarını belirtir. Zhai ve arkadaşları (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, "elektrokimyasal kapasitörler, yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek güç yoğunluğunu aynı anda elde edebilen yeni bir şarj depolama cihazı sınıfını temsil etmektedir". Bu çalışmada, 3D grafen boş yapı kullanılarak yapılan bir elektrokimyasal kapasitör, 7.4 Wh/kg enerji yoğunluğu ve 3000 W/kg güç yoğunluğu değerlerine ulaşmıştır (Zhai et al., 2011). Liu ve arkadaşları (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, kobalt hidroksit bazlı süperkapasitörlerin, yüksek enerji yoğunluğu ve güç

yoğunluğu sağlamak için tasarlandığı belirtilmektedir. Çalışmada, Co/Co(OH)₂@CF elektrotunun, 1 mA cm⁻² akım yoğunluğunda 1043 F cm⁻³ spesifik kapasitans sunduğu ve 62 W cm⁻³ güç yoğunluğunda 28 mWh cm⁻³ enerji yoğunluğu sağladığı ifade edilmektedir (Liu et al., 2021). Bu, süperkapasitörlerin yüksek performans potansiyelini göstermektedir.

3.2. Döngü Ömrü ve Güvenilirlik

Döngü ömrü ve güvenilirlik, süperkapasitörlerin uzun süreli kullanımını etkileyen diğer önemli faktörlerdir. Liu (2024) çalışmasında, süperkapasitörlerin "son derece yüksek döngü ömrü" sunduğunu belirtmektedir (Liu et al., 2024). Bu özellik, süperkapasitörlerin, özellikle sürekli enerji depolama gereksinimi olan uygulamalarda tercih edilmesinin başlıca nedenlerinden biridir. Pan ve arkadaşları (2020) ise, "optimize edilmiş PCNF'ler (porlu karbon nanoflaklar) tabanlı çinko iyon hibrit süperkapasitörlerin, mükemmel döngü stabilitesi ve etkileyici enerji yoğunluğu sunduğunu" vurgulamaktadır (Pan et al., 2020). Ayrıca, Liu ve arkadaşları (2021) çalışmasında, Co/Co(OH)₂@CF elektrotunun 20,000 döngü sonrası %98 kapasitans tutma oranı ile olağanüstü döngü stabilitesi sunduğu ifade edilmektedir (Liu et al., 2021). Bu bulgular, süperkapasitörlerin döngü ömrü ve güvenilirlik açısından sağladığı avantajları ortaya koymaktadır.

3.3. Şarj/Deşarj Hızları

Şarj/deşarj hızları, süperkapasitörlerin performansını belirleyen bir diğer önemli parametredir. Linzen ve arkadaşları (2005), "şarj dengeleme devrelerinin, süperkapasitör sistemlerinin performansını, güvenilirliğini ve ömrünü iyileştirmek için

kullanıldığını" ifade etmektedir (Linzen et al., 2005). Bu tür devreler, şarj/deşarj sürecini optimize ederek, süperkapasitörlerin daha hızlı ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar. Cabrane ve arkadaşları (2017) tarafından önerilen hibrit enerji depolama sistemlerinde, süperkapasitörlerin, bataryalarla birlikte kullanılarak enerji yoğunluğu ve döngü ömrü açısından iyi bir denge sağladığı belirtilmektedir. Bu sistemde, süperkapasitörlerin yüksek şarj/deşarj hızları, bataryaların üzerindeki elektriksel stresi azaltarak sistemin genel performansını artırmaktadır (Cabrane et al., 2017). Yang ve Zhang (2013) ise, süperkapasitörlerin enerji kaybını ve bunun çevresel olarak güçlendirilmiş kablosuz sensör düğümlerindeki güç yönetimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, süperkapasitörlerin şarj dağılımı sırasında enerji kaybının, sistem tasarımı ve güç yönetimi açısından önemli bir faktör olduğu vurgulanmaktadır (Yang & Zhang, 2013). Bu tür yenilikler, süperkapasitörlerin şarj/deşarj hızlarını artırarak, enerji verimliliğini ve işlem süresini azaltmaktadır.

Süperkapasitörlerin enerji ve güç yoğunluğu, döngü ömrü ve güvenilirlik, şarj/deşarj hızları gibi performans parametreleri, bu enerji depolama sistemlerinin etkinliğini belirleyen önemli unsurlardır. Literatürdeki çalışmalar, süperkapasitörlerin bu alanlarda sağladığı avantajları ve potansiyel uygulamalarını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, süperkapasitörlerin gelecekteki enerji depolama sistemlerinde daha geniş bir yer bulması beklenmektedir.

4. Süperkapasitörlerin Avantajları ve Dezavantajları

Süperkapasitörlerin en belirgin avantajlarından biri, yüksek güç yoğunluğudur. Bu özellik, süperkapasitörlerin kısa süreli yüksek enerji taleplerini karşılayabilme yeteneğinden kaynaklanmaktadır.

Örneğin, 3D karbon çerçeveler kullanılarak üretilen süperkapasitörler, "ultrafast charge/discharge rate" (ultra hızlı şarj/deşarj hızı) sunarak, 100 A g^{-1} akım yoğunluğunda 0.064 V gibi düşük bir iç dirençle çalışabilmektedir (Leng et al., 2021). Bu durum, süperkapasitörlerin enerji depolama uygulamalarında hızlı tepki verme yeteneklerini artırmakta ve bu da onları elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji sistemleri gibi alanlarda cazip kılmaktadır. MyungSuk Son ve JunHyung Ryu'nun çalışmasında, süperkapasitörlerin "yüksek spesifik güç, yüksek kapasitans ve neredeyse sonsuz döngü ömrü" gibi özelliklere sahip olduğu belirtilmektedir (Son & Ryu, 2021). Bu özellikler, süperkapasitörlerin hızlı şarj vedeşarj işlemlerine olanak tanır. Özellikle, "elektronik cihazlarda bellek yedekleme ve kesintisiz güç kaynağı (UPS)" gibi uygulamalarda bu özellikler büyük avantaj sağlamaktadır (Son & Ryu, 2021). Ayrıca, süperkapasitörler, elektrikli araçlar ve akıllı şebekelerin güç kalitesi sistemleri gibi yüksek güç/enerji yoğunluğu gerektiren uygulamalarda da kullanılmaktadır (Son & Ryu, 2021). Miroslav Krasimirov Andreev'in çalışmasında, süperkapasitörlerin "enerji depolama sistemlerinde hızlı şarj/deşarj yetenekleri" ile "uzun döngü ömrü" sunduğu vurgulanmaktadır [(Andreev, 2020). Bu özellikler, süperkapasitörlerin hibrit enerji depolama sistemlerinde (HESS) batarya ile kullanılmasını mümkün kılarak, her iki enerji kaynağının avantajlarından faydalanmayı sağlar (Andreev, 2020).

Hızlı şarj/deşarj yeteneği, süperkapasitörlerin bir diğer önemli avantajıdır. Bu özellik, enerji sistemlerinin daha verimli çalışmasını sağlar. Örneğin, "3DCF-DO" adı verilen bir süperkapasitör, $0,65$ saniyede maksimum kapasitesinin $\%77.4$ 'ünü şarj edebilmekte ve bu

da onu hızlı enerji taleplerini karşılamak için ideal bir seçenek haline getirmektedir (Leng et al., 2021). Bu hızlı tepki süresi, özellikle enerji depolama sistemlerinin anlık enerji taleplerine yanıt vermesi gereken durumlarda büyük bir avantaj sunar. Janardhanan R Rani ve arkadaşları, MnO₂/reduced graphene oxide (rGO) hibrit nanoskrollar kullanarak geliştirdikleri süperkapasitörlerin "gelişmiş enerji yoğunluğu ve üstün hız performansı" sunduğunu göstermektedir (Rani et al., 2020). Bu tür hibrit yapılar, süperkapasitörlerin enerji depolama kapasitesini artırma potansiyeline sahiptir.

Ancak, süperkapasitörlerin sınırlı enerji yoğunluğu, önemli bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Enerji yoğunluğu, bir enerji depolama sisteminin depolayabileceği enerji miktarını ifade eder ve süperkapasitörler, geleneksel bataryalarla karşılaştırıldığında bu alanda daha zayıf kalmaktadır. Örneğin, karbon nanotüplerin enerji yoğunluğu 8571 Wh kg⁻¹ gibi yüksek değerlere ulaşabilse de, süperkapasitörlerin enerji yoğunluğu genellikle bu seviyelerin altında kalmaktadır (Bai et al., 2019). Bu durum, süperkapasitörlerin uzun süreli enerji depolama gereksinimlerini karşılamakta yetersiz kalmasına neden olur. Ayrıca, organik süperkapasitörlerin potansiyeli üzerine yapılan bir incelemede, bu cihazların "yüksek enerji yoğunluğu, düşük maliyet ve hafif yapıları" gibi avantajlarına rağmen, hala "geliştirilmesi gereken birçok zorluk" bulunduğu vurgulanmaktadır (Biswas & Chowdhury, 2023). Bu zorluklar, süperkapasitörlerin enerji yoğunluğunu artırma çabalarını etkileyen önemli faktörlerdir.

Süperkapasitörlerin enerji yoğunluğunun sınırlı olması, uygulama alanlarını da kısıtlamaktadır. Özellikle, sürekli enerji talep

eden sistemlerde, süperkapasitörlerin enerji depolama kapasitesi yetersiz kalabilir. Bu nedenle, süperkapasitörler genellikle bataryalarla birlikte kullanılarak, her iki teknolojinin avantajlarından faydalanılmaktadır. Örneğin, süperkapasitörler, hızlı enerji taleplerini karşılamak için kullanılabilirken, bataryalar daha uzun süreli enerji depolama için tercih edilmektedir (Cheng, 2010).

Süperkapasitörler, yüksek güç yoğunluğu ve hızlı şarj/deşarj özellikleri ile önemli avantajlar sunarken, sınırlı enerji yoğunluğu gibi dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Bu durum, süperkapasitörlerin enerji depolama sistemleri içindeki rolünü ve potansiyelini etkileyen kritik bir faktördür. Gelecek araştırmalar, bu dezavantajları aşmak ve süperkapasitörlerin enerji yoğunluğunu artırmak için yeni malzeme ve tasarım stratejileri geliştirmeye odaklanmalıdır.

5. Modern Uygulama Alanları

Günümüzde enerji sistemleri, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği açısından önemli bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Bu dönüşüm, elektrikli araçlar, hibrit sistemler ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ile şekillenmektedir. Elektrikli araçlar, çevre dostu ulaşım çözümleri sunarak fosil yakıt bağımlılığını azaltmakta ve bu bağlamda yenilenebilir enerji sistemleri ile çalışarak enerji verimliliğini artırmaktadır. Özellikle, elektrikli ve hibrit araçların enerji sistemleri üzerindeki etkisi, bu araçların enerji kaynakları ile entegrasyonunu gerektirmektedir.

Elektrikli araçlar, fosil yakıt bağımlılığını azaltma ve çevresel sorunları çözme potansiyeline sahip bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Baronti ve arkadaşları, elektrikli araçların enerji

depolama sistemleri (ESS) teknolojilerinin, bataryalar ve süper kapasitörler dahil olmak üzere önemli ölçüde geliştirildiğini vurgulamaktadır. Bu gelişmeler, elektrikli araçların güvenliğini, güvenilirliğini ve verimliliğini artırmak için bir batarya yönetim sisteminin gerekliliğini ortaya koymaktadır (Baronti et al., 2016). Ayrıca, şarj altyapısının, elektrik enerjisinin şebekeden elektrikli araçlara etkili ve güvenilir bir şekilde aktarılması açısından kritik bir öneme sahip olduğunu belirtmektedirler. Bu durum, elektrikli araçların yaygınlaşması için gerekli olan altyapının geliştirilmesine yönelik bir ihtiyaç doğurmaktadır. Hibrit enerji sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu sağlamak için önemli bir araçtır. Demir ve Aydın, hibrit sistemlerin, yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken doğası nedeniyle yedekleme üniteleri ile kullanılmasının önemini vurgulamaktadır. Bu sistemler, farklı enerji kaynaklarının bir arada kullanılmasını sağlayarak, enerji üretiminde süreklilik ve verimlilik sunmaktadır (Aydın & Demir, 2019). Ayrıca, hibrit sistemlerin, yenilenebilir enerji kaynakları ile kullanıldığında daha stabil bir elektrik üretimi sağladığını ifade etmektedirler. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji sistemlerinin hibrit yapılarla entegrasyonu, enerji yönetimi açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Elektrikli ve hibrit araçlar, çevre dostu ulaşım alternatifleri olarak dünya genelinde kabul görmektedir. K.T. Chau'nun 2016 yılında yayımladığı çalışmasında, elektrikli ve hibrit araçların en çevre dostu kara taşımacılığı çözümleri olarak tanımlandığı belirtilmektedir. Bu araçların enerji sistemleri, enerji kaynakları, batarya şarj sistemleri ve araç-ağa sistemleri gibi üç ana enerji teknolojisi üzerine odaklanmaktadır (Chau, 2016). Bu bağlamda, elektrikli araçların enerji sistemleri ile entegrasyonu,

yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır.

Yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu, özellikle değişken enerji kaynaklarının (güneş, rüzgâr gibi) kullanımı açısından önem taşımaktadır. Hvelplund ve arkadaşlarının 2015 yılında yayımladığı çalışmada, "Smart Energy Systems" yaklaşımının, değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu için gerekli esnekliği sağladığı vurgulanmaktadır (Mathiesen et al., 2015). Bu sistemler, elektrik, ısıtma ve ulaşım sektörlerini birleştirerek, enerji üretimi ve tüketimi tarafında yeniden düşünmeyi ve tasarlamayı gerektirmektedir. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji sistemlerinin hibrit sistemlerle entegrasyonu, enerji verimliliğini artırmakta ve sürdürülebilir enerji çözümleri sunmaktadır.

Hibrit enerji sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra geleneksel enerji kaynaklarını da bir araya getirerek, enerji üretiminde esneklik sağlamaktadır. Demir ve Aydın'ın 2019 yılında yayımladığı çalışmada, hibrit sistemlerin farklı enerji kaynaklarının birleşimini sağladığı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcut sistemlere entegrasyonunu kolaylaştırdığı ifade edilmektedir (Aydın & Demir, 2019). Bu sistemler, yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken doğası nedeniyle yedekleme üniteleri ile kullanılmakta ve enerji talebinin karşılanmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Tüketici elektroniği alanında da yenilenebilir enerji sistemlerinin etkisi giderek artmaktadır. Özellikle, enerji depolama sistemleri ve güç dönüştürücü elektronik devreler, elektrikli ulaşım ve akıllı şebekelerin evrimi ile yakından ilişkilidir. Saponara ve

Mihet-Popa'nın 2019 yılında yayımladığı çalışmada, enerji depolama sistemleri ve güç dönüştürücü elektronik devrelerin, elektrikli ulaşım ve akıllı şebekeler üzerindeki etkileri ele alınmaktadır (Saponara & Mihet-Popa, 2019). Bu sistemlerin yenilenebilir enerji kaynakları ile entegrasyonu, enerji verimliliğini artırmakta ve sürdürülebilir enerji çözümleri sunmaktadır.

Elektrikli araçlar, hibrit sistemler ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, modern enerji sistemlerinin temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Bu sistemlerin etkin kullanımı, çevresel sürdürülebilirliği artırmakta ve enerji verimliliğini sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji sistemlerinin hibrit sistemlerle entegrasyonu, enerji talebinin karşılanmasında önemli bir rol oynamakta ve tüketici elektroniği alanında da yenilikçi çözümler sunmaktadır. Bu bağlamda, modern enerji sistemlerinin geleceği, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımı ve elektrikli araçların entegrasyonu ile şekillenecektir.

6. Süperkapasitörlerin Geleceği

Geleneksel bataryaların sınırlamalarını aşmak ve daha yüksek enerji yoğunluğu ile daha hızlı şarj-deşarj döngüleri sağlamak amacıyla süperkapasitörler, çeşitli malzeme ve yapı tasarımları ile geliştirilmiştir. Bu bağlamda, süperkapasitörlerin gelişimi hem araştırma hem de uygulama alanında büyük bir ivme kazanmıştır.

Süperkapasitörlerin temel avantajlarından biri, yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip olmalarıdır. Zhang (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, hibrit asimetrik süperkapasitörlerin yüksek enerji ve güç yoğunluğunu gerçekleştirebildiği vurgulanmaktadır. Bu tür süperkapasitörler, çevresel kirliliği azaltma ve enerji

sürdürülebilirliğini sağlama potansiyeline sahiptir (Zhang, 2021). Bu özellikleri, onları gelecek nesil enerji depolama cihazları olarak umut verici kılmaktadır.

Hibrit ve asimetrik süperkapasitörlerin tasarımında kullanılan elektrot malzemeleri, performans üzerinde kritik bir etkiye sahiptir. Andreev (2020) çalışmasında, süperkapasitörlerin enerji yoğunluğu, eşdeğer seri direnç ve otomotiv sektöründeki optimal kullanımları üzerine kapsamlı bir inceleme sunulmaktadır. Bu incelemede, süperkapasitörlerin batarya ile kombinlenerek hibrit enerji depolama sistemlerinde nasıl kullanılabileceği ve bu sistemlerin genel performansı nasıl artırabileceği ele alınmıştır (Andreev, 2020). Bu tür hibrit sistemler, süperkapasitörlerin hızlı şarj ve deşarj yeteneklerinden faydalanarak, enerji verimliliğini artırmaktadır.

Yeni nesil süperkapasitörlerin geliştirilmesinde, malzeme tasarımı ve elektrot yapıları büyük önem taşımaktadır. Yıldırım (2021) tarafından yapılan bir incelemede, yüksek performanslı süperkapasitörlerin tasarımında kullanılan yenilikçi elektrot malzemeleri ve bu malzemelerin kısa açıklamaları sunulmaktadır. Bu çalışma, süperkapasitör araştırmalarının gelecekteki yönlerini belirlemek için bir yol haritası sunmaktadır (Yıldırım et al., 2021). Özellikle, multidisipliner bir yaklaşım benimseyerek, farklı malzeme türlerinin ve yapıların bir arada kullanılması gerektiği vurgulanmaktadır.

Multidimensional nanomaterials, süperkapasitörlerin performansını artırmak için önemli bir alan olarak öne çıkmaktadır. Verma ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, multidimensional nanomaterials'in süperkapasitör

uygulamalarındaki keskin ilerlemeleri ele alınmaktadır. Bu çalışmada, grafen türevleri, kuantum noktaları, metal-organik çerçeveler (MOFs) ve MXenes gibi çeşitli malzemelerin süperkapasitörlerdeki potansiyel uygulamaları detaylandırılmaktadır (Verma et al., 2024). Grafen, süperkapasitör uygulamaları için son derece umut verici bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Salunkhe ve arkadaşları (2014), grafenin "elektrik çift katmanlı kapasitör (EDLC) uygulamaları" için büyük bir araştırma ilgisi çektiğini ve grafen bazlı süperkapasitörlerin "yüksek enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu" sağlama potansiyeline sahip olduğunu vurgulamaktadır (Salunkhe et al., 2014). Lee ve arkadaşları (2018), "crumpled grafen destekli Fe-Co ikili oksit nanoparçacıkları" kullanarak asimetrik süperkapasitörler geliştirmiştir. Bu çalışmada, elde edilen kompozitlerin yüksek enerji yoğunluğu ve uzun döngü stabilitesi sağladığı vurgulanmaktadır (Lee et al., 2018). Grafen, yüksek yüzey alanı ve mükemmel elektrik iletkenliği gibi özellikleri sayesinde, süperkapasitörlerin performansını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu tür malzemeler, süperkapasitörlerin enerji depolama kapasitesini artırmakta ve gelecekteki enerji depolama cihazları için yeni fırsatlar sunmaktadır.

Süperkapasitörlerin uygulama alanları, elektrikli ve hibrit araçlardan, yenilenebilir enerji sistemlerine kadar geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Burke ve Zhao (2015) çalışmasında, süperkapasitörlerin elektrikli sürüş araçlarında bataryalarla birlikte nasıl kullanılabileceği ve bu sistemlerin performansının nasıl artırılabilceği detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmada, süperkapasitörlerin enerji yoğunluğu ve güç kapasitesinin, mevcut ticari cihazlardan daha iyi olduğu gösterilmektedir (Burke et al.,

2014). Bu tür uygulamalar, süperkapasitörlerin gelecekteki enerji depolama sistemlerinde önemli bir rol oynamasını sağlamaktadır.

Süperkapasitörler, hibrit ve asimetrik yapılarla birlikte enerji depolama alanında devrim niteliğinde gelişmelere olanak tanımaktadır. Farklı malzeme ve yapı tasarımlarının bir araya getirilmesi, süperkapasitörlerin performansını artırmakta ve gelecekteki enerji sistemlerinin verimliliğini yükseltmektedir. Bu alandaki araştırmalar hem akademik hem de endüstriyel açıdan büyük bir önem taşımakta ve multidisipliner bir yaklaşım gerektirmektedir.

Sonuç ve Değerlendirme

Enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksiz üretimi ve anlık enerji taleplerindeki dalgalanmalar gibi temel zorlukları ele almayı amaçlayan kritik teknolojilerdir. Süperkapasitörler, bu sistemler içinde yüksek güç yoğunluğu, hızlı şarj ve deşarj kapasiteleri ile ön plana çıkmaktadır (Burke et al., 2014). Enerji geri kazanım sistemlerinden elektrikli araçlara kadar geniş bir uygulama yelpazesinde, geleneksel bataryalara kıyasla daha hızlı enerji sağlama yetenekleri sayesinde tercih edilmektedir (Sadavar et al., 2024).

Süperkapasitörlerin yenilenebilir enerji entegrasyonundaki rolü de dikkate değerdir. Güneş ve rüzgâr enerjisi gibi değişken kaynaklarla birleştirildiğinde, enerji depolama ve dağıtım sistemlerini dengeleyerek şebeke stabilitesine önemli katkılar sağlarlar (Verma et al., 2024). Örneğin, fotovoltaiik panellerle entegre edilen süperkapasitörler, üretilen fazla enerjiyi depolayarak enerji kayıplarını azaltır ve bu enerjiyi ihtiyaç duyulduğunda hızlı

bir şekilde kullanıma sunar (Lee et al., 2018). Bu özellik, özellikle elektrik şebekelerinin sürdürülebilirliği açısından kritik bir öneme sahiptir.

Ayrıca, süperkapasitörler hibrit enerji depolama sistemlerinde bataryalarla birlikte kullanıldığında, her iki teknolojinin güçlü yönlerinden faydalanmak mümkündür. Süperkapasitörler, hızlı enerji taleplerini karşılarken, bataryalar uzun süreli enerji depolama ihtiyacını destekler (Burke et al., 2014). Bu hibrit yapı, enerji sistemlerinin genel performansını artırarak hem maliyet etkinliği hem de operasyonel verimlilik sağlamaktadır.

Süperkapasitörlerin enerji depolama kapasitesini artırmak ve maliyetlerini düşürmek için yapılan araştırmalar, bu teknolojinin gelecekteki başarısını belirleyecektir. Özellikle, nanomalzemelerin kullanımı, enerji yoğunluğunu artırmak için önemli fırsatlar sunmaktadır. Grafen, karbon nanotüpler ve metal oksit bazlı malzemeler hem çift tabaka kapasitansını hem de faradik süreçleri geliştirerek süperkapasitörlerin performansını artırmaktadır (Lee et al., 2018; Verma et al., 2024). Örneğin, hibrit asimetrik süperkapasitörler hem yüksek enerji hem de güç yoğunluğu sunarak sürdürülebilir enerji uygulamalarında daha geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Sadavar et al., 2024).

Katı hal elektrolitlerin entegrasyonu da gelecekteki önemli bir araştırma alanıdır. Geleneksel sıvı elektrolitlerin yerini alan bu malzemeler, süperkapasitörlerin güvenliğini artırırken enerji yoğunluğu ve çevresel dayanıklılık gibi kritik parametreleri iyileştirebilir (Liu & Li, 2022). Bu gelişme, özellikle elektrikli

araçlar gibi yüksek güvenlik gereksinimi olan uygulamalarda önemli bir fark yaratabilir.

Ayrıca, süperkapasitörlerin enerji yönetim sistemleri ile daha etkili entegrasyonu, yenilenebilir enerji şebekelerinde daha fazla verimlilik sağlayabilir. Akıllı şebeke uygulamalarında, süperkapasitörler enerji dağıtımını optimize ederek, talep yoğunluklarını dengeleyebilir ve enerji kayıplarını azaltabilir (Burke et al., 2014). Bunun yanı sıra, mobil cihazlardan medikal cihazlara kadar taşınabilir enerji depolama gereksinimlerinde de süperkapasitörlerin rolü artacaktır.

Bu teknolojinin potansiyelinin tam olarak gerçekleştirilmesi, multidisipliner yaklaşımları ve gelişmiş üretim tekniklerini içerecektir. Özellikle, baskı teknolojileri ve çevre dostu malzemelerle üretim, süperkapasitörlerin maliyet etkinliğini artırırken çevresel etkilerini minimize edebilir (Verma et al., 2024).

Kaynakça

Adedjoja, O. S., Sadiku, E. R., & Hamam, Y. (2023). An Overview of the Emerging Technologies and Composite Materials for Supercapacitors in Energy Storage Applications. *Polymers*, 15(10). <https://doi.org/ARTN 227210.3390/polym15102272>

Andreev, M. K. (2020). An overview of supercapacitors as new power sources in hybrid energy storage systems for electric vehicles. 2020 XI National Conference with International Participation (ELECTRONICA),

Aydın, Ö., & Demir, Z. (2019). Smart grid integreted with hybrid renewable energy systems. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 20, 120-131.

Bai, Y. X., Shen, B. Y., Zhang, S. L., Zhu, Z. X., Sun, S. L., Gao, J., Li, B. H., Wang, Y., Zhang, R. F., & Wei, F. (2019). Storage of Mechanical Energy Based on Carbon Nanotubes with High Energy Density and Power Density. *Advanced Materials*, 31(9). <https://doi.org/ARTN 180068010.1002/adma.201800680>

Baronti, F., Chow, M. Y., Ma, C. B., Rahimi-Eichi, H., & Saletti, R. (2016). E-transportation: the role of embedded systems in electric energy transfer from grid to vehicle. *Eurasip Journal on Embedded Systems*. <https://doi.org/ARTN 1110.1186/s13639-016-0032-z>

Biswas, S., & Chowdhury, A. (2023). Organic Supercapacitors as the Next Generation Energy Storage Device: Emergence, Opportunity, and Challenges. *Chemphyschem*, 24(3). <https://doi.org/10.1002/cphc.202200567>

Burke, A., Liu, Z. M., & Zhao, H. B. (2014). Present and Future Applications of Supercapacitors in Electric and Hybrid Vehicles. 2014 Ieee International Electric Vehicle Conference (Ievc). <Go to ISI>://WOS:000380394300020

Cabrane, Z., Ouassaid, M., & Maaroufi, M. (2017). Management and Control of the Integration of Supercapacitor in Photovoltaic Energy Storage. 2017 International Conference on Green Energy & Conversion Systems (Gecs). <Go to ISI>://WOS:000413691500009

Chau, K. T. (2016). Energy systems for electric and hybrid vehicles. The Institution of Engineering and Technology (IET).

Cheng, Y. H. (2010). Assessments of Energy Capacity and Energy Losses of Supercapacitors in Fast Charging-Discharging Cycles. Ieee Transactions on Energy Conversion, 25(1), 253-261. <https://doi.org/10.1109/Tec.2009.2032619>

Emeksİz, C., & Kara, B. (2022). Enerji Depolama Teknolojilerinin İncelenmesi ve Karşılaştırmalı Analizi. International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 6(2), 134-142.

Godse, L., Karandikar, P., & Gosavi, S. (2013). Effect of ball milling on capacitance of electrochemical double layer capacitor. 2013 IEEE Global Humanitarian Technology Conference: South Asia Satellite (GHTC-SAS),

Ibrahim, T., Stroe, D., Kerekes, T., Sera, D., & Spataru, S. (2021). An overview of supercapacitors for integrated PV - energy storage panels. 2021 Ieee 19th International Power Electronics and

Motion Control Conference (Pemc), 828-835.
<https://doi.org/10.1109/Pemc48073.2021.9432540>

Lee, C., Kim, S. K., Choi, J. H., Chang, H., & Jang, H. D. (2018). Hybrid crumpled graphene supported Fe-Co binary oxides nanoparticles for aqueous asymmetric supercapacitors. *Applied Surface Science*, 448, 571-575.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.147>

Leng, C. Y., Zhao, Z. B., Song, Y. Z., Sun, L. L., Fan, Z. J., Yang, Y. Z., Liu, X. G., Wang, X. Z., & Qiu, J. S. (2021). 3D Carbon Frameworks for Ultrafast Charge/Discharge Rate Supercapacitors with High Energy-Power Density. *Nano-Micro Letters*, 13(1).
<https://doi.org/ARTN 810.1007/s40820-020-00535-w>

Lian, K., Wu, H. R., Genovese, M., Virya, A., Li, J., & Ton, K. (2018). Sustainable Materials for Solid Flexible Supercapacitors. 2018 International Flexible Electronics Technology Conference (Ifetc). <Go to ISI>://WOS:000460767800040

Linzen, D., Buller, S., Karden, E., & De Doncker, R. W. (2005). Analysis and evaluation of charge-balancing circuits on performance, reliability, and lifetime of supercapacitor systems. *Ieee Transactions on Industry Applications*, 41(5), 1135-1141.
<https://doi.org/10.1109/Tia.2005.853375>

Liu, H., & Li, C. (2022). Recent Developments of Solid-State Electrolytes for All-Solid-State Lithium Metal Batteries. 2022 3rd International Conference on Clean and Green Energy Engineering (CGEE),

Liu, P., Wang, F. C., Zhang, Z., Li, J., Fan, H. J., & Yang, C. (2021). Facile Preparation of Cobalt Hydroxide Based Supercapacitor with High Volumetric Energy Density at High Volumetric Power Density. 2021 22nd International Conference on Electronic Packaging Technology, Icept. <https://doi.org/10.1109/Icept52650.2021.9567978>

Liu, W. T., Sun, X. Z., Yan, X. Y., Gao, Y. H., Zhang, X., Wang, K., & Ma, Y. W. (2024). Review of Energy Storage Capacitor Technology. Batteries-Basel, 10(8). <https://doi.org/ARTN27110.3390/batteries10080271>

Mathiesen, B. V., Lund, H., Connolly, D., Wenzel, H., Østergaard, P. A., Möller, B., Nielsen, S., Ridjan, I., Karnøe, P., & Sperling, K. (2015). Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions. Applied Energy, 145, 139-154.

Najib, S. (2020). Investigation of asymmetric hybrid supercapacitor based on morphology of zinc oxide electrode materials for high energy supercapacitors

Pacheco, M., Monroy, M. F., Santana-Diaz, A., Pacheco, J., Valdivia-Barrientos, R., Tu, X., González-Pedroza, A., & Ramirez-Palma, M. T. (2020). Enhancement of a Green Supercapacitor With a Hydrogel/Carbon Nanotubes-Based Electrolyte. Ieee Transactions on Nanotechnology, 19, 711-718. <https://doi.org/10.1109/Tnano.2020.3019764>

Pan, Z. M., Lu, Z. M., Xu, L., & Wang, D. W. (2020). A robust 2D porous carbon nanoflake cathode for high energy-power density

Zn-ion hybrid supercapacitor applications. *Applied Surface Science*, 510. <https://doi.org/ARTN 14538410.1016/j.apsusc.2020.145384>

Polat, S. (2019). Enerji depolama sistemleri için elektrot materyallerinin geliştirilmesi.

Rani, J. R., Thangavel, R., Kim, M., Lee, Y. S., & Jang, J. H. (2020). Ultra-High Energy Density Hybrid Supercapacitors Using MnO/Reduced Graphene Oxide Hybrid Nanoscrolls. *Nanomaterials*, 10(10). <https://doi.org/ARTN 204910.3390/nano10102049>

Sadavar, S. V., Lee, S. Y., & Park, S. J. (2024). Advancements in Asymmetric Supercapacitors: From Historical Milestones to Challenges and Future Directions. *Advanced Science*, 11(34). <https://doi.org/10.1002/advs.202403172>

Salunkhe, R. R., Lee, Y. H., Chang, K. H., Li, J. M., Simon, P., Tang, J., Torad, N. L., Hu, C. C., & Yamauchi, Y. (2014). Nanoarchitected Graphene-Based Supercapacitors for Next-Generation Energy-Storage Applications. *Chemistry-a European Journal*, 20(43), 13838-13852. <https://doi.org/10.1002/chem.201403649>

Saponara, S., & Mihet-Popa, L. (2019). Energy Storage Systems and Power Conversion Electronics for E-Transportation and Smart Grid. *Energies*, 12(4). <https://doi.org/ARTN 66310.3390/en12040663>

Son, M., & Ryu, J. (2021). Recent Research Trends of Supercapacitors for Energy Storage Systems. *Clean Technology*, 27(4), 277-290.

Sun, J. Z., Cui, B., Chu, F. Q., Yun, C. H., He, M., Li, L. H., & Song, Y. L. (2018). Printable Nanomaterials for the Fabrication of High-Performance Supercapacitors. *Nanomaterials*, 8(7). <https://doi.org/ARTN 52810.3390/nano8070528>

Sundriyal, S., Shrivastav, V., Dubey, P., Singh, M., Deep, A., & Dhakate, S. R. (2022). Highly Porous Carbon From Azadirachta Indica Leaves and Uio-66 Derived Metal Oxide for Asymmetrical Supercapacitors. *Ieee Transactions on Nanotechnology*, 21, 60-65. <https://doi.org/10.1109/Tnano.2022.3144367>

Vakrilov, N. V., & Kafadarova, N. M. (2022). A Review of Supercapacitors State of Health Estimation Methods. 2022 XXXI International Scientific Conference Electronics (ET),

Verma, S., Verma, S., Kumar, S., & Verma, B. (2024). Multidimensional Nanomaterials for Supercapacitors: Next Generation Energy Storage. Bentham Science Publishers.

Yang, H. Z., & Zhang, Y. (2013). Analysis of Supercapacitor Energy Loss for Power Management in Environmentally Powered Wireless Sensor Nodes. *Ieee Transactions on Power Electronics*, 28(11), 5391-5403. <https://doi.org/10.1109/Tpel.2013.2238683>

Yildirim, I. D., Ammar, A. U., Buldu-Akturk, M., Bakan, F., & Erdem, E. (2021). Strategies to reach ultrahigh capacitance values for supercapacitors: materials design. *Turkish Journal of Physics*, 45(4), 178-184. <https://doi.org/10.3906/fiz-2104-14>

Zhai, Y. P., Dou, Y. Q., Zhao, D. Y., Fulvio, P. F., Mayes, R. T., & Dai, S. (2011). Carbon Materials for Chemical Capacitive

Energy Storage. *Advanced Materials*, 23(42), 4828-4850.
<https://doi.org/10.1002/adma.201100984>

Zhang, H. (2021). Tailoring solid state electrodes for the development of next generation asymmetric supercapacitors. 2021 3rd International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST)

BÖLÜM III

Fotovoltaik Enerji Depolama Teknolojisi

NIHAL DELİGÖNÜL¹

GİRİŞ

Küresel çevre sorunları ve artan enerji talebi, yenilenebilir enerji teknolojilerindeki sürekli ilerlemelerle birlikte alternatif enerji kaynaklarının kullanılmasını gerekli kılmaktadır(Rathore, Panwar, Yettou, & Gama, 2021). Güneş enerjisi, günümüze kadar tüm uzun vadeli doğal kaynaklar arasında en ekonomik ve en bol bulunan enerji kaynağıdır. Aynı zamanda ekonomik büyümeyi sürdürülebilir bir şekilde destekleyen güvenli ve temiz enerji kaynağı olarakta bilinmektedir(Parida, Iniyan, & Goic, 2011a). Elektrik üretiminde kullanılabilecek en verimli ve çevre dostu enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisi, gelecekteki enerji ihtiyacını karşılamak adına

¹ Prof. Dr. Nihal Deligönül, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Tokat/TÜRKİYE, Orcid: 0000-0002-7381-2611, nihal.deligonul@gop.edu.tr

önemli bir rol oynamaktadır(Ibn-Mohammed et al., 2017). Fotovoltaik (PV) hücreler, güneş ışığını elektriğe dönüştürmenin en etkili yollarından biridir.Fotovoltaik (PV), güneş ışığını elektriğe dönüştürmek için fotovoltaik etki gösteren yarı iletkenler kullanan bir elektrik üretme yöntemidir. Bu süreç, güneş ışığını doğru akım elektriğine dönüştürür(Shayani Mehr et al., 2022).

Fotovoltaik etki, ışığın bir PN bağlantısına (güneşe bakan N tipi yarı iletken bölgesi) çarpmasıyla başlar. Yarı iletken malzemenin enerji boşluğu ile eşdeğer enerjiye sahip fotonlar emilir ve bu, elektronlar ve yük taşıyıcı boşlukların oluşmasına yol açar. Bu elektronlar ve boşluklar, yerleşik potansiyel sayesinde ayrılır ve oluşan voltaj ölçülür. Elde edilen doğru akım (DC) voltajı, ev aletlerini çalıştırmak için alternatif akıma (AC) dönüştürülür veya endüstriyel amaçla kullanılabilir.

1.FOTOVOLTEİKLERİN KISA TARİHÇESİ

1839 yılında Fransız fizikçi Alexandre-Edmund Becquerel, elektrik iletebilen bir çözelti içinde yerleştirilen iki metal elektrottan oluşan bir elektrolitik pil ile yaptığı deneylerde, çözelti ışığa maruz bırakıldığında voltaj üretiminin arttığını keşfetti. Işık enerjisine bağlı olarak bu voltajdaki değişim, "Fotovoltaik Etki" olarak bilinir ve güneş pili teknolojisinin temellerini atmıştır. Fotovoltaik etki, güneş pili teknolojisinin temel prensibini oluşturur (El Chaar, Lamont, & El Zein, 2011; Kymakis & Amaratunga, 2003a).

Tablo 1. Fotovoltaik Güneş Enerjisi Dönüşümü ile Önemli Tarihsel Gelişmeler

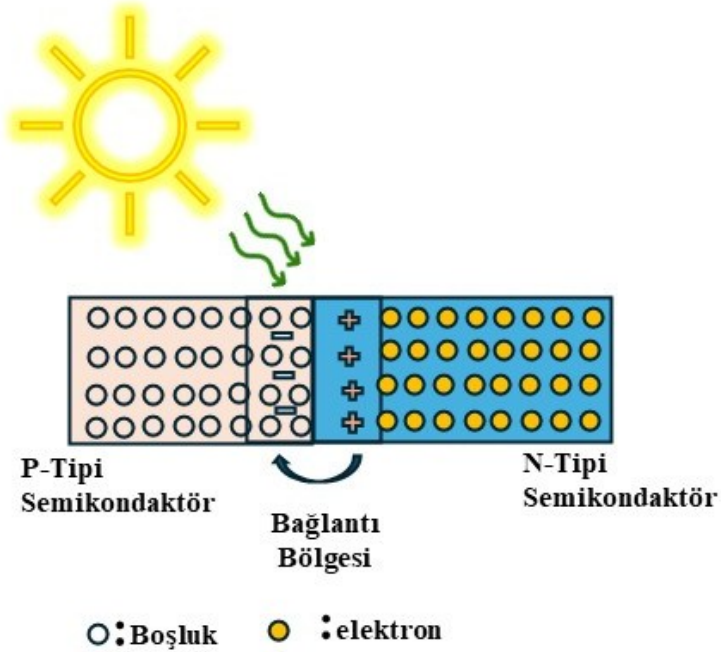
Fotovoltaiklerdeki Gelişmeler		Araştırmacılar	Yıl
Fotovoltaik etkisi keşfedildi		Becquerel	1839
Selenyumda fotovoltaik etkisi gözlemlendi		Adams ve Day	1876
Işığın kuantum doğası ortaya kondu		Planck	1900
Katı maddelerin kuantum teorisi önerildi		Wilson	1930
Katı hal doğrultucusu (diyot) teorisi geliştirildi		Mott ve Schottky	1940
Transistör icat edildi		Bardeen, Brattain ve Shockley	1949
%6 verimli silikon güneş hücresi tanıtıldı		Charpin, Fuller ve Pearson	1954
Kadmiyum sülfür bazlı güneş hücresi vurgulandı	1954	Reynolds ve diğerleri	
İlk güneş hücresi, yörüngedeki Vanguard 1 uydusunda kullanıldı	1958		

PV etkisi, ilk olarak 1870'te Selenyum gibi katı maddelerde incelenmiştir. O yıllarda bu teknolojinin pahalı ve verimliliği düşük olduğu (%1 ila %2 arasında) belirlenmiştir. 1940'lar ve 1950'lerin başlarında, saf Silikon kristali üretmek için Czochralski metodu geliştirilmiştir. Bu yöntemle üretilen kristal Silikon bazlı güneş pillerinde, %11'e kadar verimlilik sağlamıştır(Bernardes, Marques Lameirinhas, Torres, & Fernandes, 2021; Dambhare, Butey, & Moharil, 2021).

2.FOTOVOLTEİKLERİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Fotovoltaik güç üretimi, fotovoltaik malzeme içeren bir dizi güneş hücresinden oluşan güneş panelleri kullanarak gerçekleştirilir. Güneş ışığı, güneş pilinin (veya hücresinin) yüzeyine çarptığında, ışığın fotonları yarı iletken malzeme içinde enerji transfer eder. Bu enerji, elektronlar (negatif yüklü parçacıklar) ve boşluklar (pozitif

yük taşıyan eksik elektronlar) oluşturur(Gonzalez & Pascual, 2024; Kymakis & Amaratunga, 2003b; Sutikno, Arsadiando, Wangsupphaphol, Yudhana, & Facta, 2022). Bu elektronlar ve boşluklar "taşıyıcılar" olarak adlandırılır. Çünkü elektrik akımını taşırlar Şekil 1. güneş pillerinde, bir p-tipi (pozitif) ve n-tipi (negatif) yarı iletken malzeme arasındaki bölgeye p-n bağlantısı denir. Işıktan üretilen elektronlar, bu p-n bağlantısı üzerinden hareket eder. Elektronlar n-tipi tarafa doğru hareket ederken, boşluklar (eksik elektronlar) p-tipi tarafa doğru hareket eder. Bu hareket, elektrik yükü ayrımını sağlar ve pilin içinde bir elektrik alanı oluşturur (Akbari et al., 2019; Rekioua, 2023).



Şekil 1. Fotovolteliklerin Çalışma Prensipleri Özeti

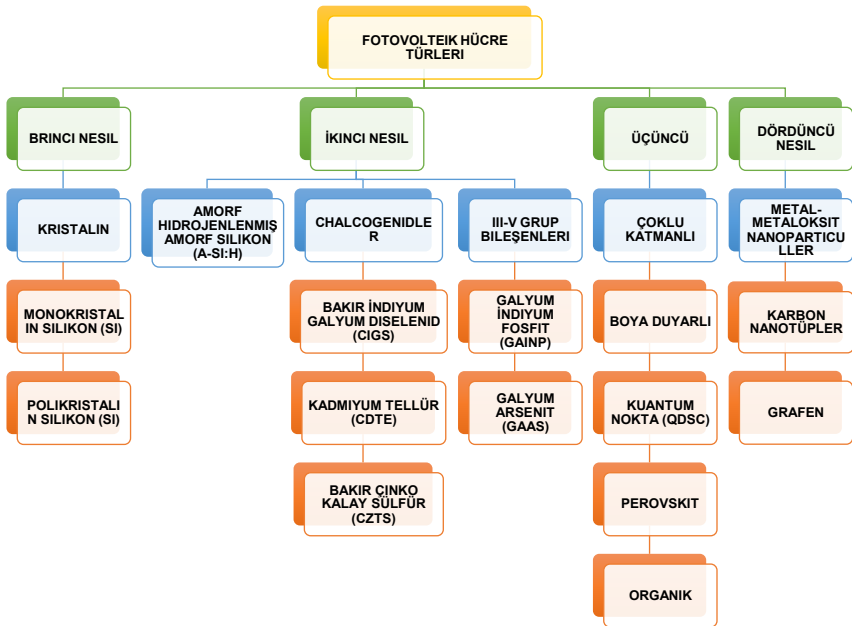
Eğer güneş pili kısa devre koşuluna sokulursa (yani dışarıda bir yük bağlanmadan iki uç birbirine bağlanırsa), taşıyıcılar (elektronlar ve boşluklar) hareket etmeye devam eder ancak şarj birikimi oluşmaz. Bunun nedeni, ışıkla üretilen taşıyıcıların dışarıdan bir direnç veya yük olmadan doğrudan cihazdan çıkmasıdır. Bu durumda elektrik enerjisi biriktirilmez. Ancak bir akım (günlük elektrik akışı) üretilir. Kısa devre koşulunda, pil yalnızca akım üretir fakat enerji depolamaz. Güneş pilinde ışık enerjisinin elektrik enerjisine dönüşmesi, sadece ışığın elektronlar ve boşluklar vasıtası ile toplamakla bitmez; aynı zamanda bu taşıyıcıların hareketiyle voltaj ve akım da oluşmalıdır. Voltaj, "fotovoltaik etki" adı verilen bir süreçle üretilir. Kısa devre koşullarında ise taşıyıcılar, cihazdan ışıkla üretilen akım olarak çıkarken, şarj birikimi meydana gelmez(Al-Ezzi & Ansari, 2022; El Chaar et al., 2011). Bu mekanizma, güneş pilelerinin enerji üretme kapasitesini belirler ve fotovoltaik teknolojilerin temel prensibini oluşturur.

3.FOTOVOLTEİK TÜRLERİ

Güneş enerjisini doğrudan elektrik üreten bir cihazda yakalamaya yönelik tüm teknolojiler fotovoltaik olarak tanımlanır. Ancak bu teknoloji, kristalin, ince film, bileşik yarı iletken ve nanoteknoloji olarak alt kategorilere ayrılmaktadır. Günümüzde fotovoltaik sistemlerde yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında monokristalin silikon, polikristalin silikon, amorf silikon, kadmiyum tellür ve bakır indiyum galyum selenid/sülfür bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik artan talep, güneş hücreleri ve fotovoltaik dizilerin üretiminde son yıllarda büyük bir ilerleme kaydedilmesine neden olmuştur. Güneş enerjisi

alanındaki en önemli konulardan biri, güneş enerjisinden en verimli şekilde faydalanabilmek için hangi güneş paneli teknolojisinin tercih edileceğidir. Son yıllarda bu alandaki bilimsel gelişmeler sayesinde araştırmacılar, güneş hücresi teknolojilerinin iyileştirilmesinde önemli ilerlemeler kaydetmiştir.

Güneş enerjisinden maksimum verim elde etmek için uygun güneş paneli teknolojisini seçilmesi önemli bir zorluktur. Son yıllarda yapılan bilimsel ilerlemeler, güneş hücresi teknolojilerinin daha verimli ve dayanıklı hale gelmesini sağlamıştır. Fotovoltaik (PV) sistemler, çevreye zarar vermeden elektrik üretir, uzun ömürlüdür (yaklaşık 20 yıl) ve daha az bakım gerektirir. Dağlık ve ulaşılması zor alanlarda bile kolayca kurulum yapabilir, mobil sistemlerde kullanılabilir ve şebekeden bağımsız çalışabilirler.



Şekil 2. Fotovoltaik Sistemlerde Kullanılan Sınıflandırma

PV modülleri, düşük enerji yoğunluğuna sahip güneş ı    nı elektriğe dönüştürür, bu yüzden geniş yüzey alanına ihtiyaç duyarlar. Üretim teknolojilerindeki gelişmeler daha verimli sistemlerin ortaya çıkmasını sağlamakta ve gelecekte bu sistemlerin daha yaygın kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Bu yenilikler, güneş enerjisinin sürdürülebilir enerji çözümleri olarak daha büyük bir rol oynamasını sağlayacaktır. Şekil 2. en sık kullanılan Fotovoltaik sistemlerde kullanılan sınıflandırma türlerini özetlemektedir (Bernardes et al., 2021; Dambhare et al., 2021; Parida, Iniyana, & Goic, 2011b).

Fotovoltaik sistemler (PV'ler), genellikle iki ana sınıflandırma temelinde gruplanır. İlk sınıflandırma, güneş hücrelerinde kullanılan aktif malzemelere dayanmaktadır. Bu sınıflama fotovoltaik hücrelerin temel işlevini yerine getiren ve ışığı elektriğe dönüştüren malzemelere odaklanır. Güneş hücrelerinde kullanılan başlıca malzemeler arasında silikon, kadmiyum tell  r  r (CdTe), bakır indiyum galyum selenid (CIGS) ve organik malzemeler yer alır. Her bir malzeme, ışık emme kapasitesi, enerji dönüşüm verimliliği, maliyet ve dayanıklılık gibi çeşitli faktörler açısından farklı özellikler sunar. Bu farklı özellikler, her bir malzeme türünü belirli kullanım koşullarına ve teknolojik gereksinimlere uygun hale getirir. Örneğin silikon genellikle yüksek verimlilik ve dayanıklılık sa  glarken, organik malzemeler daha düşük maliyetli olabilir. Ancak verimlilik açısından silikon kadar etkili değildir (Bhatia, 2014; Eggimann, Patel, Johnston, & Herz, 2020; Fu et al., 2024; Hagfeldt & Gr  tzel, 2000).

İkinci sınıflandırma fotovoltaik cihazların genel yapısına dayalıdır. Burada fotovoltaik hücrenin yapısı ve tasarımı g  z önünde bulundurularak cihazlar çeşitli kategorilere ayrılır. Bu kategoriler

arasında tek kristalin silikon, polikristalin silikon, ince film ve organik PV sistemleri bulunur. Her bir yapı üretim yöntemlerine ve dolayısıyla enerji verimliliği, maliyet, esneklik ve üretim hızına bağlı olarak kendine özgü avantajlar sunar. Örneğin tek kristalin silikon hücreler genellikle daha yüksek verimlilik sağlar. Ancak üretim maliyeti daha yüksek olabilir. Polikristalin silikon hücreler ise daha düşük maliyetli ancak biraz daha düşük verimlilik ile sunar. İnce film hücreler, düşük maliyetli olmasının yanı sıra daha esnek yüzeylerde kullanılabilmesi gibi avantajlar sunar ancak genellikle daha düşük enerji verimliliğine sahiptirler. Organik PV sistemleri ise gelecekte daha ucuz ve esnek çözümler sunma potansiyeline sahip olmakla birlikte, verimlilikleri hala geliştirilmeye ihtiyaç duymaktadır.

3.1. Birinci Nesil PV Teknolojileri

Günümüzde piyasada bulunan en yaygın güneş panelleri, silikon güneş hücrelerinden oluşmaktadır. Güneş panelleri, genellikle silikon malzemeden yapılmış paralel ve seri bağlı bir dizi güneş hücresinden oluşur. Birinci nesil fotovoltaik (PV) teknolojileri, monokristalin ve polikristalin silikon güneş hücrelerini içerir. Monokristalin silikon güneş hücreleri, "tek kristaller" olarak bilinir ve bu hücreler düzgün bir renk ve düzenli şekilleriyle kolayca tanınabilir. Saf silikon kullanımı sayesinde yüksek verimlilik sunar ve estetik açıdan da dikkat çeker. Monokristalin hücreler, genellikle silindirik şekle sahip silikon ingotlarından üretilir. Silikon levhalar oluşturulurken, silindirik ingotlardan dört taraf kesilir. Bu işlem, monokristalin hücrelere kendine özgü bir şekil kazandırır, maliyetleri düşürür ve tek bir monokristalin hücrenin performansını iyileştirir(Rathore et al., 2021).

Diğer yandan, polikristalin silikon güneş hücreleri, "polisilikon" (P-Si) veya "çok kristalli silikon" (mc-Si) olarak bilinir ve birden fazla kristalin birleşiminden oluşur. Polikristalin hücreler genellikle daha uygun fiyatlıdır. Ancak monokristalin hücrelere göre biraz daha düşük verimlilik sağlarlar. Bu hücreler, genellikle yuvarlak kenarlardan yoksun, dikdörtgen bir şekle sahiptir ve bu özellik, monokristalin ve polikristalin güneş panellerini birbirinden ayırt etmenin kolay bir yoludur. Her iki hücre tipi de güneş enerjisinin verimli bir şekilde elektriğe dönüşmesini sağlamak için kullanılır. Ancak her biri farklı maliyet, verimlilik ve uygulama gereksinimlerine göre tercih edilir.

3.2. İkinci Nesil PV Teknolojileri: İnce Film Güneş Hücreleri (TFSC)

İkinci nesil fotovoltaik (PV) teknolojileri, ince film güneş hücrelerini (TFSC) içerir. Bu hücrelerde, yarı iletken malzeme üzerine düzensiz kristallerle yapılmış bir veya birden fazla ince PV malzeme katmanı yerleştirilir. İnce film katmanları, birkaç nanometreden onlarca mikrometreye kadar değişen kalınlıklara sahip olabilir. Bu ince yapılar, güneş ışığını emme kapasitesini etkilemekle birlikte, kristallerin düzensiz yapısı da hücrenin genel verimliliğini belirleyen faktörler arasındadır. İnce film güneş hücrelerinin, geleneksel kristalin silikon hücrelerine göre birçok avantajı bulunmaktadır.

İnce film güneş hücrelerinin üç ana türü vardır:

3.2.1. Kadmiyum Tellürür (CdTe)

Bu tip hücreler, güneş ışığından elektrik üretmek için kadmiyum tellürür kullanır. CdTe hücreleri, düşük maliyetli ve

verimli üretim süreçleri ile dikkat çeker. Ayrıca bu malzeme, güneş ışığını etkili bir şekilde emme kapasitesine sahiptir. Bu da onları endüstriyel ölçekte üretmek için uygun hale getirir(Rathore et al., 2021).

3.2.2. Amorf Silikon (a-Si)

Amorf silikon, kristal silikonun aksine düzensiz bir yapıya sahip olan bir malzemedir. Bu hücreler genellikle daha esnek ve hafif olup, çok çeşitli uygulamalara olanak tanır. Amorf silikon hücreleri, düşük maliyetli üretim ve esneklik gibi avantajlar sunarken, verimlilik açısından kristalin hücrelere kıyasla biraz daha düşük performans gösterir.

3.2.3. Bakır İndiyum Diselenid (CIS) / Bakır İndiyum Galyum Selenid (CIGS)

Bu hücreler, yüksek verimlilik sağlayan ve aynı zamanda esnek panellerin üretimine olanak tanıyan bakır indiyum diselenid (CIS) ve bakır indiyum galyum selenid (CIGS) gibi bileşikler kullanır. CIGS hücreleri, çeşitli yüzeylere kolayca uygulanabilir ve mükemmel ışık emme kapasitesine sahip oldukları için çok dikkat çekmektedir.

İkinci nesil fotovoltaik (PV) teknolojileri, çeşitli avantajlarla dikkat çeker. Öncelikle bu panellerin üretimi, kristalin silikon güneş hücrelerine kıyasla daha düşük maliyetlerle gerçekleştirilebilir. Üretim süreçlerinin daha basit ve hızlı olması, seri üretimi daha verimli hale getirir. Ayrıca ince film güneş hücrelerinin yüzeyi daha homojen olduğundan, görsel olarak daha estetik bir görünüm sunar, bu da onları çeşitli ticari ve konut uygulamaları için uygun hale getirir (Shayani Mehr et al., 2022).

3.3. Üçüncü Nesil Fotovoltaik Hücre Teknolojileri

Üçüncü nesil fotovoltaik (PV) teknolojileri, özellikle henüz gelişim aşamasında olan ve ticari kullanıma sınırlı erişimi olan ince film hücrelerini kapsar. Bu teknolojiler, organik güneş hücreleri, CPV (gölgeleme duyarlı hücreler), kuantum nokta hücreleri, perovskit güneş hücreleri, bakır çinko kalay sülfür (CZTS) hücreleri ve çoklu birleşim hücreler gibi yenilikçi çözümleri içerir. Geleneksel silikon bazlı teknolojilerden farklı olarak, bu hücreler çevre dostu malzemeler kullanarak daha verimli ve maliyet açısından avantajlı alternatifler sunmayı hedefler (Hasan et al., 2009; Van De Lagemaat et al., 2006).

Bu teknolojilerin en belirgin avantajlarından biri, organik güneş hücrelerinin büyük ölçekte enerji üretimi için ekonomik açıdan büyük bir potansiyele sahip olmasıdır. Organik malzemeler, güneş ışığını etkin bir şekilde emebilirken, sürdürülebilirlikleri sayesinde çevreye olumsuz etkiler yaratmazlar. Ayrıca organik hücrelerin üretim maliyetleri daha düşük olup, bu durum daha uygun fiyatlarla enerji üretmeye olanak tanır. Enerji üretiminde maliyetlerin düşürülmesi, kaynak kullanımının azaltılması ve çevre dostu üretim süreçlerinin uygulanması organik güneş hücrelerinin önemli avantajları arasında yer alır.

Silikon bazlı hücrelerdeki yüksek üretim maliyetleri ve hammaddelerin sınırlılığı, projelerin daha uzun vadeli ve sürdürülebilir bir şekilde gerçekleştirilmesini zorlaştırabilir. Buna karşın, organik güneş hücreleri, daha basit üretim süreçlerine sahip olup daha hızlı ve düşük maliyetli üretilebilmektedir. Bu da organik hücrelerin daha geniş bir uygulama alanına sahip olmasına yardımcı

olur ve büyük ölçekli enerji üretimi konusunda maliyet avantajı sağlar(Pope, 1962; Yu, Gao, Hummelen, Wudl, & Heeger, 1995).

4. SONUÇ

Organik ve diğer üçüncü nesil fotovoltaik teknolojileri, daha verimli ve düşük maliyetli enerji çözümleri sunma potansiyeline sahiptir. Bu teknolojiler, güneş enerjisinin daha geniş bir ölçekte benimsenmesini sağlayarak, gelecekteki enerji üretiminde önemli bir rol oynayabilir. Fotovoltaik güneş enerjisi teknolojileri, sürdürülebilir enerji üretimi açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştüren bu teknolojiler, çevre dostu, güvenli ve ekonomik enerji kaynakları sunmaktadır. Birinci nesil fotovoltaik teknolojilerinin yaygın kullanımı, güneş enerjisinin gelecekte daha da yaygınlaşacağını göstermektedir. İkinci nesil ince film güneş hücreleri ve üçüncü nesil organik, perovskit gibi yeni teknolojiler, güneş enerjisinin daha düşük maliyetlerle kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Fotovoltaik sistemler, düşük bakım gereksinimi, uzun ömürlülük ve çevre dostu özellikleriyle büyük bir potansiyele sahiptir. Bu gelişmeler, teknolojinin verimlilik artışı ve maliyet düşüşü sağlayarak, güneş enerjisinin enerji sektöründe önemli bir rol oynamasına katkı sunacaktır.

KAYNAKÇA

Akbari, H., Browne, M. C., Ortega, A., Huang, M. J., Hewitt, N. J., Norton, B., & McCormack, S. J. (2019). Efficient energy storage technologies for photovoltaic systems. *Solar Energy*, 192, 144–168. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2018.03.052>

Al-Ezzi, A. S., & Ansari, M. N. M. (2022). Photovoltaic Solar Cells: A Review. *Applied System Innovation 2022, Vol. 5, Page 67*, 5(4), 67. <https://doi.org/10.3390/ASI5040067>

Bernardes, S., Marques Lameirinhas, R. A., Torres, J. P. N., & Fernandes, C. A. F. (2021). Characterization and Design of Photovoltaic Solar Cells That Absorb Ultraviolet, Visible and Infrared Light. *Nanomaterials 2021, Vol. 11, Page 78*, 11(1), 78. <https://doi.org/10.3390/NANO11010078>

Bhatia, S. C. (2014). Energy resources and their utilisation. *Advanced Renewable Energy Systems*, 1–31. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-269-3.50001-2>

Dambhare, M. V., Butey, B., & Moharil, S. V. (2021). Solar photovoltaic technology: A review of different types of solar cells and its future trends. *Journal of Physics: Conference Series*, 1913(1), 012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1913/1/012053>

Eggimann, H. J., Patel, J. B., Johnston, M. B., & Herz, L. M. (2020). Efficient energy transfer mitigates parasitic light absorption in molecular charge-extraction layers for perovskite solar cells. *Nature Communications 2020 11:1*, 11(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19268-w>

El Chaar, L., Lamont, L. A., & El Zein, N. (2011). Review of photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2165–2175. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.01.004>

Fu, J., Yang, Q., Huang, P., Chung, S., Cho, K., Kan, Z., ... Li, G. (2024). Rational molecular and device design enables organic solar cells approaching 20% efficiency. *Nature Communications* 2024 15:1, 15(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46022-3>

Gonzalez, P., & Pascual, U. (2024). Energy use, Human. *Encyclopedia of Biodiversity, Third Edition: Volume 1-7*, V3-484-V3-501. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822562-2.00369-8>

Hagfeldt, A., & Grätzel, M. (2000). Molecular Photovoltaics. *Accounts of Chemical Research*, 33(5), 269–277. <https://doi.org/10.1021/AR980112J>

Hasan, T., Sun, Z., Wang, F., Bonaccorso, F., Tan, P. H., Rozhin, A. G., & Ferrari, A. C. (2009). Nanotube - Polymer composites for ultrafast photonics. *Advanced Materials*, 21(38–39), 3874–3899. <https://doi.org/10.1002/ADMA.200901122>

Ibn-Mohammed, T., Koh, S. C. L., Reaney, I. M., Acquaye, A., Schileo, G., Mustapha, K. B., & Greenough, R. (2017). Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1321–1344. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.05.095>

Kymakis, E., & Amaratunga, G. A. J. (2003a). Photovoltaic cells based on dye-sensitisation of single-wall carbon nanotubes in a polymer matrix. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 80(4), 465–472. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2003.08.013>

Kymakis, E., & Amaratunga, G. A. J. (2003b). Photovoltaic cells based on dye-sensitisation of single-wall carbon nanotubes in a polymer matrix. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 80(4), 465–472. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2003.08.013>

Parida, B., Iniyar, S., & Goic, R. (2011a). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625–1636. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.11.032>

Parida, B., Iniyar, S., & Goic, R. (2011b). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625–1636. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.11.032>

Pope, M. (1962). Surface ionization energies of organic compounds: Phthalocyanines. *The Journal of Chemical Physics*, 36(10), 2810–2811. <https://doi.org/10.1063/1.1732378>

Rathore, N., Panwar, N. L., Yettou, F., & Gama, A. (2021). A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications. *International Journal of Ambient Energy*, 42(10), 1200–1217. <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1592774>

Rekioua, D. (2023). Energy Storage Systems for Photovoltaic and Wind Systems: A Review. *Energies* 2023, Vol. 16, Page 3893, 16(9), 3893. <https://doi.org/10.3390/EN16093893>

Shayani Mehr, P., Hafezalkotob, A., Fardi, K., Seiti, H., Movahedi Sobhani, F., & Hafezalkotob, A. (2022). A comprehensive framework for solar panel technology selection: A BWM- MULTIMOOSRAL approach. *Energy Science & Engineering*, 10(12), 4595–4625. <https://doi.org/10.1002/ESE3.1292>

Sutikno, T., Arsadiando, W., Wangsupphaphol, A., Yudhana, A., & Facta, M. (2022). A Review of Recent Advances on Hybrid Energy Storage System for Solar Photovoltaics Power Generation. *IEEE Access*, 10, 42346–42364. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3165798>

Van De Lagemaat, J., Barnes, T. M., Rumbles, G., Shaheen, S. E., Coutts, T. J., Weeks, C., ... Glatkowski, P. (2006). Organic solar cells with carbon nanotubes replacing In₂O₃: Sn as the transparent electrode. *Applied Physics Letters*, 88(23). <https://doi.org/10.1063/1.2210081>

Yu, G., Gao, J., Hummelen, J. C., Wudl, F., & Heeger, A. J. (1995). Polymer photovoltaic cells: Enhanced efficiencies via a network of internal donor-acceptor heterojunctions. *Science*, 270(5243), 1789. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.270.5243.1789>

BÖLÜM IV

Enerji Depolaması İçin Metal-Organik Çerçeve Tabanlı Malzemeler

NIHAL DELİGÖNÜL¹

GİRİŞ

Temiz enerji depolama ve iletimi teknolojilerine olan küresel talep artarken, mevcut teknolojilerin sınırlamaları yeni enerji kaynaklarının kullanımını zorunlu kılmaktadır (Kumar et al., 2020). Piller ve süperkapasitörler taşınabilirlikleriyle umut verici çözümler sunarken, mevcut malzemelerin kimyasal ve fiziksel sınırlamaları performansı kısıtlamaktadır (Butova, Soldatov, Guda, Lomachenko, & Lamberti, 2016). Polimerler ve iletken karbon malzemeleri düşük maliyetli olsa da stabiliteleri yetersizdir. Metal oksitler ve silikon gibi katı inorganik malzemeler ise güçlü yapıları nedeniyle tercih edilse de iyon yayılımı ve hacimsel değişiklikler nedeniyle şarj

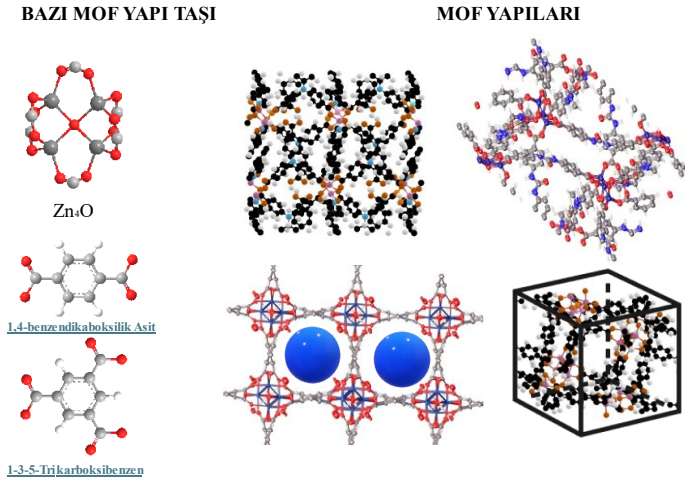
¹ Prof. Dr. Nihal Deligönül, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Tokat/TÜRKİYE, Orcid: 0000-0002-7381-2611, nihal.deligonul@gop.edu.tr

hızları sınırlıdır. Bu sınırlamalar, yeni malzemelerin geliştirilmesi gerekliliğini doğurmaktadır (Sandhu et al., 2024). (Zheng et al., 2023). Metal-organik çerçeveler (MOF'ler), yeni nesil enerji depolama teknolojileri için umut verici malzemelerdir. MOF'ler metal düğümleri ve organik bağlayıcılar arasındaki bağlantılarla oluşturulan gözenekli yapılardır. Bu yapılar malzemelerin kimyasal ve yapısal özelliklerini esnek bir şekilde özelleştirmeyi sağlar. Böylece MOF'ler, belirli uygulamalar için gerekli porozite, stabilite ve iletkenlik gibi özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanabilir (Zhou, Long, & Yaghi, 2012). MOF'lerin esnek yapısı, enerji depolama cihazlarının ihtiyaçlarını karşılamak için avantaj sunar ve elektro-kimyasal sınırlamaları aşmaya yardımcı olabilir. Ayrıca, gözenekliliği, enerji depolama ve iyon taşıma süreçleri için önemlidir. MOF'ler çeşitli karakterizasyon teknikleriyle incelenebilir ve bu, performanslarını etkileyen faktörlerin anlaşılmasına yardımcı olur. MOF'lerden türetilen malzemeler, enerji depolama alanında daha iyi performans sergileyebilecek potansiyele sahiptir (Furukawa, Cordova, O'Keeffe, & Yaghi, 2013; Qiu et al., 2020).

1.METAL-ORGANİK ÇERÇEVELERİN YAPILARI

Metal-organik çerçeveler (MOF'ler), organik liganlar ile metal iyonlarının kimyasal bağlarla birleşmesi sonucu, yüksek poroziteye ve büyük yüzey alanlarına sahip periyodik ağ yapılı kristal yapılar oluşturur. Bu özellikler MOF'lerin çeşitli bilimsel ve teknolojik alanlarda potansiyel uygulamalarını destekler. Son yıllarda emici malzemeler, zeolitler ve MOF'ler, enerji, algılama ve gaz depolama gibi birçok farklı uygulama için kimya bilimlerinde önemli bir ilgi görmüştür (Pettinari & Tombesi, 2023). MOF'lerin en ilgi çekici

özellği, gözenekli yapıları sayesinde parçacıkların bir kütle yapısına dağılmasını sağlamasıdır. Gözeneklerin düzeni ve boyutu konuk moleküller için uygun bir ortam oluşturacak şekilde belirlenir. MOF'ler esnek tasarımları sayesinde geniş bir yapısal çeşitlilik sunar ve özelleştirilmiş özelliklere sahip malzemeler üretme kapasitesine sahiptir (Şekil 3) (Borboudakis et al., 2017; He et al., 2022a; Jia et al., 2011; Kampouraki et al., 2019; Liu, Li, He, Yang, & Liu, 2022; X. Wang et al., 2019). MOF'ler son derece yüksek porozite, geniş iç yüzey alanı, yapısal özelleştirilebilirlik, kristalin yapı, fonksiyonel çeşitlilik ve çok yönlülük gibi avantajlara sahiptir. MOF'ler genellikle geniş iç yüzey alanına (500–7000 m²/g), yapısal esnekliğe, ayarlanabilir poroziteye, değişken organik işlevselliğe ve fiziksel/termal stabiliteye sahip olup, bunlar MOF'leri aktif karbonlar ve zeolitler gibi geleneksel geçirgen malzemelere kıyasla güçlü bir alternatif haline getirir.



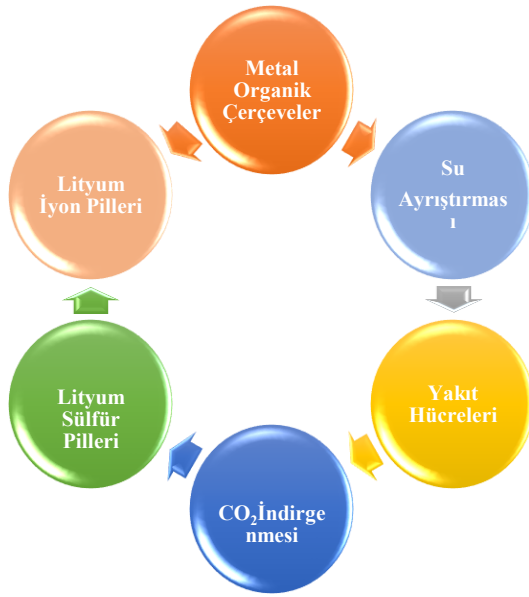
Şekil 3. MOF Bulding Blok ve Bazı MOF Yapıları

MOF'ler (Metal-Organik Çerçevesler) boşluklu yapıları sayesinde olağanüstü büyük iç yüzey alanlarına sahip olup, etkileşimsel özellikleri bileşenlerin fizikokimyasal özelliklerine bağlı olarak şekillenir. 1990'ların sonlarına doğru hızla gelişen bu alanda, UC Berkeley'den Omar Yaghi'nin öncülüğünde MOF'ler, özel olarak tasarlanmış boşluklu malzemelerin sunduğu faydalı özelliklerle dikkat çekmiştir. Bugüne kadar 90.000'den fazla MOF yapısı rapor edilmiştir. MOF'ler metal iyonları ve organik bağlayıcılar arasındaki koordinasyon ile tasarlanmış emici yapılardır.

2.MOF'LERİN ENERJİ DEPOLAMADA KULLANIM ALANLARI

MOF'ler yüksek yüzey alanları ve üstün yapısal özellikleri sayesinde fotokataliz, elektrokataliz ve enerji depolama gibi uygulamalarda büyük potansiyele sahiptir. Bu özellikleri, çevre dostu ve yenilenebilir enerji çözümlerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynayabilir. Fotokataliz ışık enerjisiyle kimyasal reaksiyonları hızlandırarak hidrojen (H_2) ve oksijen (O_2) üretimi veya CO_2 'nin indirgenmesiyle karbon temelli yakıtların elde edilmesini sağlar. Elektrokataliz ise elektrik enerjisinin kimyasal reaksiyonları hızlandırmak için kullanıldığı bir yöntemdir ve suyun ayrıştırılması, atmosferdeki azot ve karbondioksit gibi gazların indirgenmesi gibi birçok enerji dönüşüm sisteminde yer alır. Elektrokataliz yakıt hücreleri ve metal-hava piller gibi enerji üretim teknolojilerinin temelini oluşturur. Ayrıca süperkapasitörler (SC'ler), lityum-iyon piller ve lityum-sülfür piller gibi elektrokimyasal enerji depolama teknolojileri, taşınabilir elektronik cihazlar, elektrikli araçlar ve elektrik şebekeleri için çevre dostu bir

şekilde enerji depolamak ve salıvermek için kullanılır. Bu sistemler elektriğin verimli bir şekilde depolanmasını ve gerektiğinde salınmasını sağlar (Şekil 4). Ancak bu teknolojilerde hala bazı zorluklar bulunmaktadır. Konvansiyonel fotokatalizörler, dar bir soğurma bölgesine sahip oldukları için ışık verimliliği konusunda zorluklar yaşar. Ayrıca taşıyıcıların uzun mesafelerde hareket etmesi, elektron ve deliklerin birleşmesine neden olarak fotokatalitik verimliliği düşürür.



Şekil 4. MOF'ların Enerji Depolamada Kullanımı

Karmaşık fotokatalizörler ise düşük gözeneklilik, az aktif alan ve düşük stabilite gibi problemlere sahiptir. Elektrokatalizörler de genellikle yüksek aşırı potansiyel ve yavaş kinetiklere sahiptir, bu da fazla enerji tüketimine yol açar. Bu zorlukların üstesinden

gelindiğinde bu enerji dönüşüm ve depolama sistemleri daha verimli ve çevre dostu hale gelebilir.

2.1.Karbon Yakalama ve Depolamada Metal-Organik Çerçeveler (CCS)

Karbon yakalama ve depolama (CCS), metal-organik çerçevelerin (MOF'ler) enerji depolama alanındaki kullanımının oldukça faydalı bir uygulama alanıdır. MOF'ler endüstriyel baca gazlarından karbondioksit (CO_2) yakalama konusunda olağanüstü bir potansiyel göstermektedir. Geleneksel amin bazlı adsorbanlarla kıyaslandığında, MOF'ler daha yüksek seçicilik, kapasite ve döngüsel stabiliteye sahip oldukları için eşdeğer bir CO_2 yakalama kapasitesine ulaşmak için daha az malzeme kullanılması gerekmektedir. Bu da malzeme tüketimini ve çevresel etkileri azaltır. Yüksek yüzey alanları ve mükemmel adsorpsiyon performansları nedeniyle zeolit (ZSM-5) ve bakır bazlı metal-organik çerçeveler (Cu-MOF) gibi adsorbanlar seçilmiştir. ZSM-5'in maksimum partikül boyutu ve yüzey alanı sırasıyla 25-66 mikrometre ve 1.7-442 m^2 iken, Cu-MOF için bu değerler sırasıyla 102-149 mikrometre ve 1.7-1400 m^2 'dir. Çalışmalar, Zn-MOF'un düşük basınç koşullarında daha yüksek CO_2 adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. İdeal koşullarda Zn-MOF'un CO_2 adsorpsiyonu 145.1 mmol g^{-1} 'e kadar çıkmaktadır. CO_2 adsorbanları geliştirmek için Cu-BTC çerçevesi, sırasıyla 1 bar basınçta 0°C ve 25°C'de maksimum CO_2 kapasitesine sahip düzenli mezoparöz aktif karbon (AC), aktif olmayan karbon (OMC) ve azot içeren mikroporöz karbon (NC) gibi gözenekli karbon malzemeleriyle birleştirilmiştir. Ayrıca, post-kombustiyon CO_2 toplama için en düşük parazit enerji, nikel isonikotinat bazlı ultra mikroporöz bir

MOF'ta gözlemlenmiştir. Bu MOF, daha önce en yüksek performansı gösteren Mg-MOF-74'ten daha düşük enerji tüketimiyle CO₂ toplama sağlar. Son olarak, Ce-MOF üzerinde bulunan Pd nano parçacıkları, Ce(III)/Ce(IV) merkezlerinde depolanan oksijene ek olarak oksijeni ince bir palladyum oksit tabakası şeklinde depolar ve CO₂ oksidasyonu ile bu oksijeni serbest bırakabilir. Bu özellikler Pd/Ce-MOF'un daha düşük sıcaklıklarda önemli bir CO₂ Emilimi sergilemesini sağlar (Shanmugam, Agamendran, Sekar, & Natarajan, 2023).

Table 1. Metal-Organik Çerçevenin CO₂ Yakalama Kapasitesini ve Çalışma Koşulları

Metal Merkezi	Yüzey Alanı (m ² /g)	CO ₂ Adsorpsiyon Kapasitesi	Çalışma Koşulları
ZSM-5 Zeolit	1.7 - 442	-	25-66 µm
Cu-MOF	1.7 - 1400	-	102-149 µm
Zn-MOF	-	145.1 mmol/g	77 K, 40 bar
Cu-BTC + Karbon Malzemeler	-	CO ₂ 8.24 mmol/g (1 bar, 0°C)	1 bar, 0-25°C
Nikel İsonikotinat Bazlı MOF	-	-	CO ₂ toplama
Pd/Ce-MOF	-	-	Düşük sıcaklıkta CO ₂ Emilimi

2.2.Hidrojen Dapolama

MOF'ler özellikle yakıt hücreleri gibi enerji uygulamaları için hidrojen depolama konusunda en önemli molekül ailesinden biridir. Geleneksel hidrojen depolama yöntemleri, yüksek basınçlı tanklar ve kriyojenik sıvılaştırma gibi tekniklerle yapılmaktadır. Ancak bu yöntemler hidrojenin güvenli bir şekilde depolanmasıyla ilgili zorluklar ve enerji verimliliği sorunlarıyla karşı karşıyadır. Yüksek basınçta hidrojen depolamak, enerji tüketimini artırabilir ve güvenlik

riskleri oluşturabilirken, kriyojenik sıvılaştırma da düşük verimlilik ve karmaşık altyapılar gerektirir (Ibarra et al., 2011). MOF'ler bu sorunlara alternatif olarak öne çıkmaktadır. MOF'lerin en büyük avantajı, hidrojenin düşük basınçlarda ve ılımlı sıcaklıklarda depolanabilmesidir. Bu özellik hem güvenliği artırır hem de enerji verimliliğini iyileştirir. MOF'ler geniş yüzey alanları, yüksek porozite ve kimyasal olarak stabil yapıları sayesinde hidrojen gibi gazları etkili bir şekilde adsorbe edebilir. Bu nedenle MOF'ler daha az malzeme kullanılarak yüksek miktarda hidrojen depolanmasını sağlar bu da çevresel etkileri azaltır ve daha sürdürülebilir enerji çözümleri sunar. Metal-Organik çerçevelerin (MOF'ler) hidrojen depolama kapasitesi, kullanılan metal merkeze bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir (Zhu & Zheng, 2023). Çinko (Zn) içeren çerçeveler, çinko-pirazolat bazlı MOF örneğinde olduğu gibi, 77 K sıcaklık ve 40 bar basınç altında %4.7'lik bir hidrojen depolama kapasitesine ulaşmaktadır. Çinko yüksek basınçlarda hidrojenin adsorplanmasını sağlayan bir metal olarak bilinse de çinko içeren MOF'ler genellikle düşük sıcaklıklar gerektirdiği için bu tür depolama yöntemlerinin enerji maliyetleri göz önünde bulundurulmalıdır. Scandium (Sc) içeren MOF'ler özellikle H4BPTC (bifenil-3,3',5,5'-tetrakarboksilik asit) ve H2TDA (tiofen-2,5-dikarboksilik asit) örneklerinde olduğu gibi 77 K ve 20 bar basınç altında %4.44'lük bir depolama kapasitesine sahiptir (Ibarra et al., 2011). Kobalt (Co) ve Nikel (Ni) içeren MOF'ler ise hidrojenle güçlü etkileşim gösteren açık metal katyon siteleri içerdiği için dikkat çeker. Bu tür MOF'ler geniş sıcaklık ve basınç aralıklarında yüksek hidrojen depolama kapasitesine sahiptir ve 25°C'de 100 bar ile 5 bar arasında 11.0 g L⁻¹, 75-25°C arasında ise 23.0 g L⁻¹

kapasiteye ulaşabilir (Sandhu et al., 2024). Son olarak, Zirkonyum (Zr) içeren MOF'ler de yüksek stabilite ve etkili depolama kapasitesi ile dikkat çeker. Trimesik asit ile yapılandırılmış MOF-808, 77 K'da 4 MPa basınç altında %7.31'lik hidrojen depolama kapasitesine ulaşmaktadır. Zirkonyum içeren MOF'ler, hidrojenin yüksek verimlilikle depolanmasını sağlayarak pratikte kullanılabilir bir alternatif sunar (Zhang, Liu, & Zhang, 2023).

Table 2. MOF'lerin Hidrojen Depolama Kapasitesini ve Farklı Metal Merkezlerinin Etkisini Sıcaklık ve Basınç Koşullarına Göre Değerlendirilmesi.

Kullanılan Merkezi	Metal	Hidrojen Kapasitesi	Depolama	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)
Çinko (Zn)		%4.7 (77 K, 40 bar)		77 K	40 bar
Scandium (Sc)		%4.44 (77 K, 20 bar)		77 K	20 bar
Kobalt (Co), Nikel (Ni)		11.0 g L ⁻¹ (25 °C, 100-5 bar)		25 °C	100-5 bar
Kobalt (Co), Nikel (Ni)		23.0 g L ⁻¹ (75-25 °C, 75-25 °C)		75-25 °C	100-5 bar
Zirkonyum (Zr)		%7.31 (77 K, 4 MPa)		77 K	4 MPa

2.3.Li-İyon Bataryalarında MOF

Enerji depolama sistemlerinin daha verimli çalışabilmesi için yüksek şarj ve deşarj hızları, yüksek kapasite ve uzun süreli stabilite gereklidir. MOF'ler, bu tür sistemlerde çok büyük bir potansiyel sunar çünkü bu materyaller büyük yüzey alanlarına, farklı şekillerde düzenlenebilen gözenek yapılarına ve hızlı tepkime verme kapasitesine sahiptir. MOF'ler özellikle süperkapasitörler ve piller gibi enerji depolama cihazlarında, verimli enerji depolama ve hızlı

enerji dönüşümü sağlayan oldukça etkili malzemelerdir. Bu enerji sistemlerinin daha verimli ve çevre dostu olmasına katkı sağlar. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarının günlük yaşamda artan kullanımıyla, bu tür yeni enerji depolama teknolojilerinin önemli bir yer tutması beklenmektedir (Y. Y. Wang et al., 2017)(Sandhu et al., 2024). Şarj edilebilir lityum iyon pillerinin, yüksek depolama kapasitesi, uzun ömrü, yüksek enerji yoğunluğu, hafiflikleri ve çevre dostu özellikleri gibi birçok avantajı vardır. Bu piller, şarj olurken lityum iyonlarının katottan ayrılıp anoda geçmesini ve enerji depolanmasını sağlarken, deşarj sırasında bu iyonların geri dönmesiyle enerji serbest bırakılır. MOF'lerin (metal-organik çerçeveler) üç boyutlu yapıları sayesinde yüksek gözenekliliğe sahip oldukları için büyük miktarda lityum iyonunu depolayabilme potansiyeline sahiptir. MOF'lerin yapısındaki bu gözenekler, lityum iyonlarının kolayca yerleşebileceği alanlar sağlar. Ayrıca metal katyonlarının MOF yapısında boşluklarda yerleşebilmesi, bu yapıları daha verimli hale getirir . Bu özellikler MOF'lerin lityum iyon pillerinin elektrot malzemesi olarak kullanılmasının neden umut verici olduğunu açıklar. Yani MOF'ler yüksek kapasiteli ve verimli enerji depolama sistemlerinin tasarlanmasında önemli bir rol oynayabilir (He et al., 2022b; Y. Y. Wang et al., 2017).

2.4.Li-Sülfür Bataryalarında MOF:

Lityum-sülfür piller (LSB'ler), yüksek özgül kapasite ve enerji yoğunluğu ile dikkat çekmektedir ve bu özellikler ticari lityum iyon piller (LIB'ler) ile karşılaştırıldığında çok daha üstün olmaktadır. Ancak LSB'lerin ticarileştirilmesi hala bazı zorluklarla karşı karşıyadır. Teorik kapasite ile gerçek kapasite arasındaki büyük farklar, enerji yoğunluğunda yaşanan sorunlar ve düşük döngüsel

stabilite gibi problemler, LSB'lerin yaygın kullanımını engellemektedir. Bununla birlikte sülfürün bol ve toksik olmayan bir element olması, ayrıca uygun fiyatlı olması, LSB'leri gelecekteki batarya teknolojilerinde önemli bir alternatif haline getirmektedir. LSB'lerin bu özellikleri onları özellikle çevre dostu ve düşük maliyetli enerji depolama çözümleri arayan alanlarda popüler kılmaktadır(Qiao, Jiang, Deng, & Zhou, 2019). LSB'lerin performansını iyileştirmek amacıyla yapılan çalışmalar, MOF'lerin (Metal-Organic Frameworks) bu pillerde kullanılması gerektiğini göstermektedir. MOF'ler çok poröz yapıları sayesinde büyük miktarda lityum iyonu barındırabilme kapasitesine sahiptir. Ayrıca MOF'lerin üç boyutlu yapıları, metal katyonlarının interstisyel boşluklarda bulunmasına olanak tanır, bu da lityum iyonlarının verimli bir şekilde depolanmasını sağlar. Örneğin lityum-sülfür pillerde, iletken karbon nanotüpleri (CNT'ler) ve MOF'ler kombinlendiğinde, polisülfürlerin (PS) migrasyonunu engelleyen etkili moleküler filtreler elde edilmiştir. Bu hibrit yapılar yüksek özgül kapasite ve uzun döngü ömrü sağlamakta olup düşük bozulma oranlarıyla uzun süreli stabilite sunmaktadır (F. Wang, Zhuo, Han, Chen, & Sun, 2017). Diğer bir örnek olarak TiO₂-S katotları kullanıldığında bu yapılar arasında kimyasal bağların oluşması, Li-iyonlarının difüzyon katsayısını önemli ölçüde artırır ve bu sayede daha yüksek verimlilikle çalışır. Ayrıca nikel-zirkonyum (Ni-ZIF-67) tabanlı bimetalik fosfitler azot doplanmış karbon ağlarında yer alarak, LSB'ler için oldukça düşük kapasite kaybı ile mükemmel döngüsel stabilite sağlamaktadır (Zhao et al., 2023). Özetle lityum-sülfür pillerin performansını iyileştiren bu yenilikçi malzemeler, pillerin kapasitesini, verimliliğini ve döngüsel stabilitesini artırarak,

bu teknolojilerin ticarileşmesini hızlandırma potansiyeline sahiptir. MOF'ler ve diğer yüksek performanslı bileşikler, LSB'lerin gelecekteki enerji depolama çözümlerinde önemli bir rol oynamaktadır (Rana et al., 2020).

2.5.Hidrojen Evrim Reaksiyonu (HER)

Hidrojen yüksek gravimetrik enerji yoğunluğu ile sürdürülebilir bir enerji depolama aracı olarak büyük ilgi görmektedir ve fosil yakıtların yerini alabilecek potansiyele sahiptir. Su elektrolizi, yüksek saflıkta hidrojen üretmenin kolay bir yolunu sunar. Ancak bu yöntemde kullanılan en iyi Pt (platinyum) bazlı elektrokatalizörler pahalıdır ve platin kaynağı sınırlıdır. CoSe₂–NiSe₂/NPFC, hem asidik hem de alkali çözeltilerde HER sırasında olağanüstü katalitik aktivite göstermiştir ve sırasıyla 57 mV ve 86 mV gibi düşük aşırı potansiyellerle 10 mA cm⁻² akım yoğunluğuna ulaşmıştır. Ancak pahalı maliyetler ve sınırlı kaynaklar nedeniyle HER'nin geniş çapta kullanımı sınırlıdır. Bu nedenle düşük maliyetli, yerleşik katalitik özelliklere sahip ve stabil olan metal bazlı malzemelerin yüksek verimli elektrokatalizörler olarak geliştirilmesine yönelik büyük çabalar sarf edilmektedir. Bu tür malzemeler geçiş metali oksitleri, nitrürler, selenitler, fosfitler gibi çeşitli bileşikler olabilir. Bu malzemelerin düşük maliyetleri ve uzun süreli stabiliteleri nedeniyle platin bazlı elektrokatalizörlerin yerini alması beklenmektedir. Örnek olarak, Liu ve arkadaşları(Liu et al., 2022) serbest duran bir HER katalitik moleküler organik çerçeve (MOF) olan CS@CNC NAs/CC'yi tanıtmışlardır. Burada, CoSe₂ nanoparçacıkları ile gömülü Co-N-doplanmış karbon nanoflak dizileri (CS@CNC NAs), bir birlikte çökeltme ve tavlama süreciyle karbon kumaşı (CC) üzerine büyütülmüştür (He et al., 2022a; Liu et

al., 2022; X. Wang et al., 2019). CS@CNC NAs/CC, 10 mA cm⁻² akım yoğunluğu için 84 mV'lik bir aşırı potansiyel değeri ile mükemmel HER performansı sergilemiştir. Bu, platin elektrotlarının gösterdiği 35 mV'lik verimlilik ile karşılaştırılabilir bir değerdir. Ayrıca CS@CNC NAs/CC metal elektrotu, 72 saat boyunca 84 mV'lik yüksek bir potansiyeli koruyarak mükemmel yapısal stabilite göstermiştir.

SONUÇ

MOF'ler enerji depolama ve dönüşümü alanında sundukları birçok avantajla büyük bir potansiyele sahiptir. Gözenekli yapıları, yüksek yüzey alanları, yapısal esneklikleri ve fonksiyonel çeşitlilikleri, MOF'leri enerji depolama sistemleri, karbon yakalama, hidrojen depolama ve lityum-sülfür bataryaları gibi birçok uygulama için ideal malzemeler haline getirmektedir. Özellikle elektrokimyasal enerji depolama, süperkapasitörler ve pillerde verimli performans sergileyerek enerji verimliliğini artıran ve çevre dostu çözümler sunmaktadır. MOF'ler hidrojeni düşük basınç ve ılımlı sıcaklık koşullarında depolama kapasitesine sahip olup, karbon yakalama ve depolama (CCS) alanında da yüksek kapasite ve seçicilik sunarak çevre üzerindeki olumsuz etkileri azaltmaktadır. Bununla birlikte MOF'lerin ticari uygulamalarda daha verimli hale gelmesi için bazı zorluklar bulunmaktadır. Üretim süreçleri, maliyetler ve uzun vadeli stabilite konularında daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Endüstriyel ölçekte MOF üretimi bu malzemelerin daha geniş çapta uygulanabilirliğini artıracaktır. Lityum-iyon ve lityum-sülfür bataryalarında MOF'lerin kullanımı enerji yoğunluğunu artırarak bu bataryaların performansını önemli ölçüde iyileştirebilir. Sonuç olarak MOF'lerin enerji depolama ve

evre dostu enerji çözümleri alanında önemli bir rol oynaması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

Borboudakis, G., Stergiannakos, T., Frysali, M., Klontzas, E., Tsamardinos, I., & Froudakis, G. E. (2017). Chemically intuited, large-scale screening of MOFs by machine learning techniques. *Npj Computational Materials* 2017 3:1, 3(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41524-017-0045-8>

Butova, V. V., Soldatov, M. A., Guda, A. A., Lomachenko, K. A., & Lamberti, C. (2016). Metal-organic frameworks: structure, properties, methods of synthesis and characterization. *Russian Chemical Reviews*, 85(3), 280–307. <https://doi.org/10.1070/RCR4554/XML>

Furukawa, H., Cordova, K. E., O’Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2013). The chemistry and applications of metal-organic frameworks. *Science*, 341(6149). https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1230444/SUPPL_FILE/FURUKAWA.SM.CORRECTED.PDF

He, B., Zhang, Q., Pan, Z., Li, L., Li, C., Ling, Y., ... Wei, L. (2022a). Freestanding Metal-Organic Frameworks and Their Derivatives: An Emerging Platform for Electrochemical Energy Storage and Conversion. *Chemical Reviews*, 122(11), 10087–10125. https://doi.org/10.1021/ACS.CHEMREV.1C00978/ASSET/IMAGES/LARGE/CR1C00978_0023.JPEG

He, B., Zhang, Q., Pan, Z., Li, L., Li, C., Ling, Y., ... Wei, L. (2022b). Freestanding Metal-Organic Frameworks and Their Derivatives: An Emerging Platform for Electrochemical Energy Storage and Conversion. *Chemical Reviews*, 122(11), 10087–10125.

https://doi.org/10.1021/ACS.CHEMREV.1C00978/ASSET/IMAGES/LARGE/CR1C00978_0023.JPEG

Ibarra, I. A., Yang, S., Lin, X., Blake, A. J., Rizkallah, P. J., Nowell, H., ... Schröder, M. (2011). Highly porous and robust scandium-based metal–organic frameworks for hydrogen storage. *Chemical Communications*, 47(29), 8304–8306. <https://doi.org/10.1039/C1CC11168J>

Jia, J., Sun, F., Fang, Q., Liang, X., Cai, K., Bian, Z., ... Zhu, G. (2011). A novel low density metal–organic framework with pcu topology by dendritic ligand. *Chemical Communications*, 47(32), 9167–9169. <https://doi.org/10.1039/C1CC12891D>

Kampouraki, Z. C., Giannakoudakis, D. A., Nair, V., Hosseini-Bandegharai, A., Colmenares, J. C., & Deliyanni, E. A. (2019). Metal Organic Frameworks as Desulfurization Adsorbents of DBT and 4,6-DMDBT from Fuels. *Molecules* 2019, Vol. 24, Page 4525, 24(24), 4525. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES24244525>

Kumar, S., Jain, S., Nehra, M., Dilbaghi, N., Marrazza, G., & Kim, K. H. (2020). Green synthesis of metal–organic frameworks: A state-of-the-art review of potential environmental and medical applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 420, 213407. <https://doi.org/10.1016/J.CCR.2020.213407>

Liu, L., Li, W., He, X., Yang, J., & Liu, N. (2022). In Situ/Operando Insights into the Stability and Degradation Mechanisms of Heterogeneous Electrocatalysts. *Small*, 18(7), 2104205. <https://doi.org/10.1002/SMLL.202104205>

Pettinari, C., & Tombesi, A. (2023). MOFs for Electrochemical Energy Conversion and Storage. *Inorganics* 2023, Vol. 11, Page 65, 11(2), 65. <https://doi.org/10.3390/INORGANICS11020065>

Qiao, Y., Jiang, K., Deng, H., & Zhou, H. (2019). A high-energy-density and long-life lithium-ion battery via reversible oxide–peroxide conversion. *Nature Catalysis* 2019 2:11, 2(11), 1035–1044. <https://doi.org/10.1038/s41929-019-0362-z>

Qiu, T., Liang, Z., Guo, W., Tabassum, H., Gao, S., & Zou, R. (2020). Metal–Organic Framework-Based Materials for Energy Conversion and Storage. *ACS Energy Letters*, 5(2), 520–532. <https://doi.org/10.1021/ACSENERGYLETT.9B02625>

Rana, M., AL-Fayaad, H. A., Luo, B., Lin, T., Ran, L., Clegg, J. K., ... Knibbe, R. (2020). Oriented nanoporous MOFs to mitigate polysulfides migration in lithium-sulfur batteries. *Nano Energy*, 75, 105009. <https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2020.105009>

Sandhu, Z. A., Raza, M. A., Awwad, N. S., Ibrahim, H. A., Farwa, U., Ashraf, S., ... Ali, F. (2024). Metal–organic frameworks for next-generation energy storage devices; a systematic review. *Materials Advances*, 5(1), 30–50. <https://doi.org/10.1039/D3MA00822C>

Shanmugam, M., Agamendran, N., Sekar, K., & Natarajan, T. S. (2023). Metal–organic frameworks (MOFs) for energy production and gaseous fuel and electrochemical energy storage applications. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 25(44), 30116–30144. <https://doi.org/10.1039/D3CP04297A>

Wang, F., Zhuo, H. Y., Han, X., Chen, W. M., & Sun, D. (2017). Foam-like CoO@N,S-codoped carbon composites derived from a well-designed N,S-rich Co-MOF for lithium-ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(44), 22964–22969. <https://doi.org/10.1039/C7TA07971K>

Wang, X., He, J., Yu, B., Sun, B., Yang, D., Zhang, X., ... Chen, Y. (2019). CoSe₂ nanoparticles embedded MOF-derived Co-N-C nanoflake arrays as efficient and stable electrocatalyst for hydrogen evolution reaction. *Applied Catalysis B: Environmental*, 258, 117996. <https://doi.org/10.1016/J.APCATB.2019.117996>

Wang, Y. Y., Zhang, M., Li, S. L., Zhang, S. R., Xie, W., Qin, J. S., ... Lan, Y. Q. (2017). Diamondoid-structured polymolybdate-based metal–organic frameworks as high-capacity anodes for lithium-ion batteries. *Chemical Communications*, 53(37), 5204–5207. <https://doi.org/10.1039/C6CC10208E>

Zhang, X., Liu, P., & Zhang, Y. (2023). The application of MOFs for hydrogen storage. *Inorganica Chimica Acta*, 557, 121683. <https://doi.org/10.1016/J.ICA.2023.121683>

Zhao, F., Xue, J., Shao, W., Yu, H., Huang, W., & Xiao, J. (2023). Toward high-sulfur-content, high-performance lithium-sulfur batteries: Review of materials and technologies. *Journal of Energy Chemistry*, 80, 625–657. <https://doi.org/10.1016/J.JECHEM.2023.02.009>

Zheng, Z., Alawadhi, A. H., Chheda, S., Neumann, S. E., Rampal, N., Liu, S., ... Yaghi, O. M. (2023). Shaping the Water-Harvesting Behavior of Metal-Organic Frameworks Aided by Fine-Tuned GPT Models. *Journal of the American Chemical Society*,

145(51), 28284–28295.
[https://doi.org/10.1021/JACS.3C12086/SUPPL_FILE/JA3C12086_](https://doi.org/10.1021/JACS.3C12086/SUPPL_FILE/JA3C12086_SI_002.ZIP)
SI_002.ZIP

Zhou, H. C., Long, J. R., & Yaghi, O. M. (2012). Introduction to metal-organic frameworks. *Chemical Reviews*, 112(2), 673–674.
[https://doi.org/10.1021/CR300014X/ASSET/IMAGES/MEDIUM/](https://doi.org/10.1021/CR300014X/ASSET/IMAGES/MEDIUM/CR-2012-00014X_0003.GIF)
CR-2012-00014X_0003.GIF

Zhu, Z. W., & Zheng, Q. R. (2023). Investigation of cryo-adsorption hydrogen storage capacity of rapidly synthesized MOF-5 by mechanochemical method. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(13), 5166–5174.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.11.026>

BÖLÜM V

Katı-Katı Faz Değişim Malzemelerinin Isıl Enerji Depolama Uygulamaları

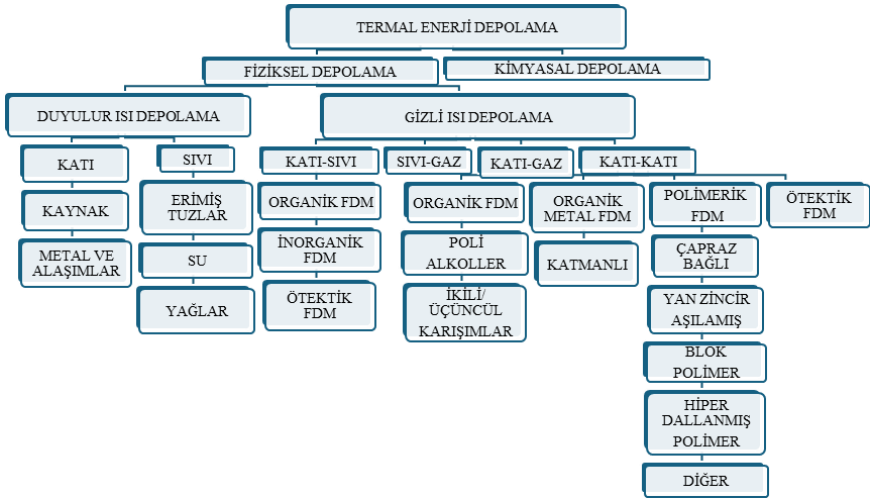
Gülşah Öner¹

GİRİŞ

Termal enerji depolama (TES), uzun süren periyotlar boyunca fazla enerjiyi depolayabilen ve depoladığı ısıyı, enerji arzı ile talebi arasındaki fark artıkça ortama geri verebilen bu sebeple verimli termal ısı depolama konusunda önemli bir ilerleme kaydetmiş sistemlerdir (Zhang vd., 2016). TES, fiziksel ve kimyasal enerji depolama olmak üzere 2 başlık altında incelenebilir. Şekil 1’de TES malzemelerinin sınıflandırması ayrıntılı olarak haritalandırılmıştır. Kimyasal ısı depolama, geri dönüşümlü kimyasal reaksiyonlar sırasında moleküler bağların oluşması veya kırılması sırasında alınan veya verilen enerjinin depolanması şeklinde gerçekleşir.

¹YL Öğrencisi.; Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı. g.yildiz2505@gmail.com ORCID No 0009-0000-8601-5104

Fiziksel depolama sistemlerinde ısı; duyulur ısı depolama ve gizli ısı depolama olarak incelenir. Duyulur ısı depolama (DID) sistemlerinde, enerji malzemede sabit bir fazda, sıcaklığın değişimi sırasında depo edilir. Malzeme ısıyı depoladığında sıcaklığı artar veya tersi durumda depoladığı ısıyı geri verdiği malzemenin sıcaklığı azalır. DID sistemlerinde depolanan ısı miktarı; malzemenin kütlesi, oluşan sıcaklık farkı ve malzemenin özgül ısı ile orantılı olarak artar. DID sistemlerinde şarj ve deşarj döngülerinin tamamen geri dönüşümlü döngüler olması beklenir. DID sistemlerinde hem katı hem de sıvı formda malzemeler kullanılabilir. DID sistemlerinde yaygın olarak seramik, beton, kaya, taş ve çelik gibi katı malzemeler kullanılırken, su, silikon yağı, terminol yağı gibi sıvı malzemeler de yaygın olarak kullanılmaktadır (Raj vd., 2020).



Şekil 1. TES malzemelerinin sınıflandırılması

Gizli ısı depolama (GID) sistemleri, sabit bir sıcaklıkta malzemenin faz değişim ısısının depolanması ile gerçekleşir. Şarj ve deşarj sırasında, katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya bir faz geçişi meydana gelir. Bu sebeple GID sistemlerinde kullanılan malzemelere genel olarak faz değişim malzemesi (FDM) denmektedir. GID sistemlerinde kullanılan FDM'ler genellikle yüksek bir füzyon gizli ısısına sahiptir. Bu füzyon ve katılaşma döngüleri sırasında büyük miktarda termal enerji depolayabilirler. FDM'ler faz ayrımı olmaksızın uygun çalışma sıcaklığında faz geçişi sergileyen yüksek miktarda gizli ısı depolama kapasitesine sahip, aşırı soğumaya direnç gösteren malzemelerdir. FDM olarak seçilen materyal ayrıca yüksek termal iletkenlik, korozyon direnci, uzun vadeli kararlılık, toksik olmama, yanmazlık ve kimyasal kararlılık gibi belirli termofiziksel özellikleri de karşılamalıdır. FDM olarak organik, inorganik, ötektik, polimerik ve organometalik gibi çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Son zamanlarda, FDM'ler klima üniteleri, telekomünikasyon sistemleri, gıda ürünleri, sıcaklığa duyarlı ilaçlar, elektronik cihazlar ve kimyasallar, otomobil egzoz ısı depolaması gibi birçok sektörlerdeki çeşitli TES uygulamalarında kullanılmaktadır.

GID sisteminde, geri dönüşümlü faz geçişi katı-katı, katı-gaz, katı-sıvı, sıvı-gaz ve tam tersi şekilde meydana gelebilir. Katı-gaz ve sıvı-gaz faz geçişlerinde katı-katı ve katı-sıvı faz geçişlerinden daha yüksek gizli depolama kapasitesine sahiptir ancak faz geçişi sırasında meydana gelen büyük hacim değişimleri sistemin tasarımını karmaşık ve zor hale getirerek termal depolama sistemlerindeki potansiyel kullanımlarını ortadan kaldırmaktadır (Sharma vd., 2009). Katı-sıvı FDM'ler (KS-FDM), TES

uygulamaları gizli ısıyı depolamak için uygundur ancak hacim artışı, FDM kümelenmesi ve FDM'nin sistemden sızması gibi handikapları nedeniyle kullanımı sınırlıdır. KS-FDM'nin bu sorunları FDM'nin kapsüllenmesi ile aşılabılır. KS-FDM olarak organik, inorganik, ötektik ve polimerik birçok FDM kullanılmaktadır.

Katı-katı FDM'ler (KK-FDM), mevcut kristal yapıdan başka yarı katı polikristal yapıya geçiş sırasında amorf bir faz geçişi sergileyen malzemelerdir. KK-FDM'nin termal kararlılığı KS-FDM ve form-stabil FDM'lere göre daha yüksektir. Literatürde son 10 yılda FDM'ler ile ilgili oldukça fazla sayıda araştırma bulunmaktadır. Ancak bu araştırmaların çoğunda KS-FDM'lere yoğun ilgi gösterilmiştir. Araştırmalar yoğunlukla KS-FDM'nin dezavantajlarının üstesinden gelmek için kullanılan çeşitli teknikler, kapsülleme ve FDM termofiziksel özelliklerini ve uzun süreli termal kararlılıkta iyileştirme uygulamalarını içermektedir. KK-FDM'nin KS-FDM'ye göre belirli hayati avantajlara sahip olmasına rağmen, bunlarla ilgili daha az sayıda inceleme bulunmaktadır. KK-FDM'ler birçok modern uygulamada kullanım için uygulanabilir hale gelmektedir. Bu nedenle, özellik iyileştirme alanındaki araştırma gelişmelerine odaklanan KK-FDM hakkında kapsamlı bir inceleme gereklidir. Bu bölümde, KK-FDM'nin türleri, faz değişim mekanizmaları, KK-FDM seçim kriterleri FDM türüne bağlı olarak ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca ticari olarak kullanılabilecek KK-FDM'leri de araştırılmıştır.

KK-FDM Sınıflandırılması ve FDM Mekanizmaları

KK-FDM'ler, iki veya daha fazla farklı katı faz arasındaki tersinir faz geçişlerinde şarj ve deşarj yoluyla ısı enerjisinin depolamasıdır. Isıtma periyodunda, malzemenin kristal yapısının

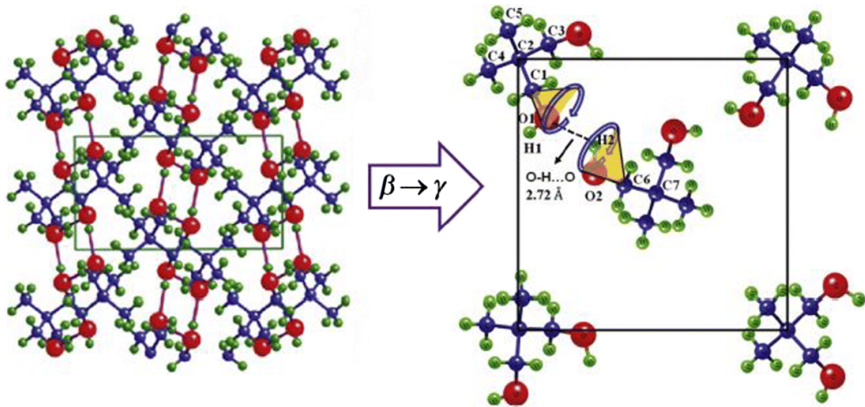
yumuşak segmentinde değişiklikler meydana gelir. Katı-katı faz geçişi sırasında malzemedeki fonksiyonel bağın rahatsız edici olmayan doğası nedeniyle polikristalin yapı/yarı kristalin yapıdan amorf yapıya geçerken daha zayıf olan bağını kırar. Katı-Katı faz geçişi mekanizması hacim genişlemesini, yüksek buhar basıncını, kümelenmeyi, sızıntıyı, yüzey reaksiyonlarını ve çekirdeklenme oranını sınırlaması sebebiyle katı-sıvı faz geçişinden daha avantajlıdır. KK-FDM'leri organik, organometalik ve polimerik olarak sınıflandırılmaktadır. Ayrıca ticari olarak kullanılan KK-FDM'leride bu bölümde özetlenmiştir.

Organik KK-FDM'ler (Polioller)

Literatürde organik KK-FDM olarak pentagliserin, pentaeritritol, neopentil glikol, 2-amino-2-metil-1,3,propandiol, tris(hidroksimetil) aminometan ve aminoglikol ayrı ayrı veya ikili, üçlü, dördüncül karışımlar halinde yaygın olarak kullanılan polialkollerdir (W. Gao vd., 2007). Organik poliollerin faz geçişi ile ilgili yapılan çalışmalarda, poliollerin düşük sıcaklıklarda düşük simetricali, katmanlı kristal yapı sergilediği ve sıcaklık faz değişim sıcaklığının ötesine yükseldiğinde yüksek simetricali, yüz merkezli kübik yapıya dönüştüğü bildirilmiştir (Benson vd., 1986) . Polioller yüksek faz geçiş entalpisine sahiptirler. Benson ve ark. poliollerin yüksek entalpilerini Şekil 2'de de gösterildiği üzere, düşük simetricali yapıdaki büyük hidrojen bağı varlığına bağlamışlardır. Pentaeritritolde faz geçişinin birinci dereceden olduğunu ve pentagliserin ile neopentil glikolün de benzer geçişleri takip ettiğini iddia etmişlerdir.

Feng ve arkadaşları yürüttükleri çalışmada, neopentil glikol, pentaeritritol ve pentagliserin poliollerinin fourier dönüşümlü

kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, polioller faz değişimine uğradığında, hidrojen bağının zayıfladığı ve sonunda yok olduğunu -OH emilim bandındaki değişiklikleri gözlemleyerek takip etmişlerdir. Entalpinin, bu moleküller arası hidrojen bağını yok etmek ve kristal kafesler arasındaki geçişi tamamlamak için emildiğini ve hidroksil gruplarının sayısındaki artışla faz değişimi entalpisinin de arttığı sonucuna varılmıştır (Feng vd., 2000). Polialkollerin entalpileri ve faz geçiş sıcaklıkları, hidroksil fonksiyonel grupları arasında bulunan hidrojen bağının yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Farklı oranlarda birbiri ile formülize edilen poliollerin faz geçiş sıcaklıkları ve entalpileri değişmektedir. Bu sebeple poliollerin ikili, üçlü ya da daha fazlası birbirleri ile çeşitli oranlarda birleştirilmektedir (Raj vd., 2020).



Şekil 2. Organik poliollerin KK-FDM'nin faz geçiş davranışı (Singh vd., 2015)

Polimerikler

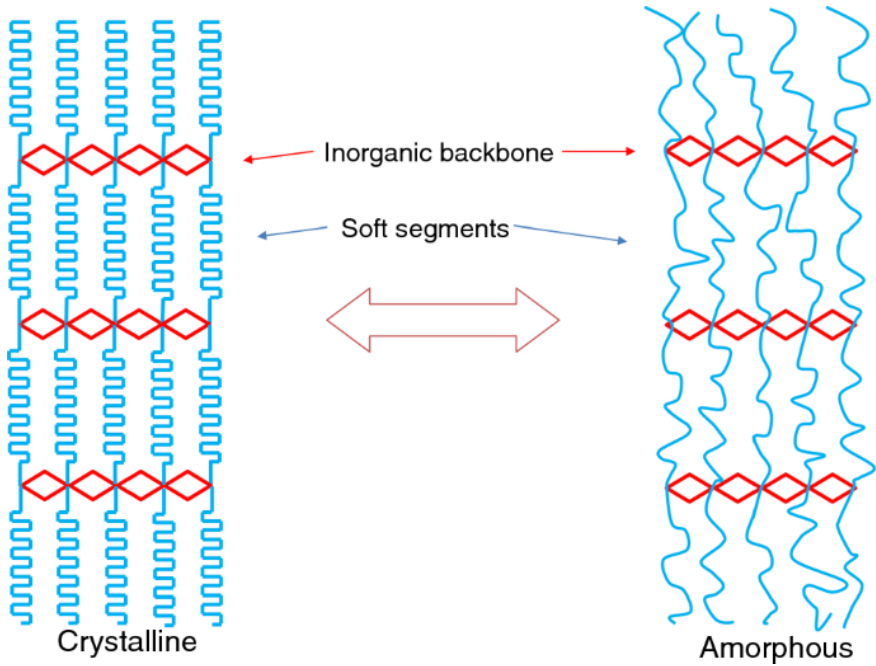
Polimerik FDM'ler, kimyasal reaksiyonlar da kullanılarak 'daha sert' bir polimere bağlanan katı-sıvı ('yumuşak') bir makromolekülden oluşur. Yumuşak kısım erimeye uğrar ve sert kısım tarafından tutulur, bu da katı-katı faz geçişine neden olur. KK-FDM elde etme yöntemlerinden biri sızıntıyı önleyen destekleyici bir polimer matrisinde FDM'yi fiziksel olarak kısıtlamaktadır. Stearik asit, palmitik asit, miristik asit gibi yağ asitlerini polietilen glikol içinde hapsedildiği çalışmada KK-FDM üretildiği çalışma bu yöntemle örnek olarak gösterilebilir (Pielichowski ve Flejtuch, 2003). Diğer bir yöntem ise, KS-FDM'yi, aşılama, bloklama ve çapraz bağlama kopolimerizasyonu gibi kimyasal yöntemlerle destekleyici yüksek erimeli bir polimere bağlayarak gerçekleştirilir (Alkan vd., 2012).

Organometalikler

$(1-C_nH_{2n+1}NH_3)_2-MX_4$ (burada; n hidrokarbon zincirindeki karbon atomu sayısı, X bir halojen ve M substratı oluşturan iki değerlikli bir metal atomu olup) formundaki organometalik KK-FDM'ler, katmanlı perovskit olarak adlandırılır. Şekil 3'de, katmanlı perovskitlerin destekleyici unsurunun, bir düzlemde köşeleri paylaşan halojenür oktahedralardan oluşan MX_4 katmanları olduğunu göstermektedir. NH_3 grupları hidrojen bağı yoluyla halojenlere ve kovalent bağ yoluyla hidrokarbon zincirine bağlanır. Kartmanlar ise Van der Waals kuvvetleri tarafından bir arada tutulan yapılardır.

Katmanlı perovskitlerin entalpileri ve faz geçiş sıcaklıkları amindeki alkil zincirlerinin uzunluğuna bağlı olup karbon atomu

sayısı artıkça entalpi ve faz geçiş sıcaklığı artar. Metalik tuz kısmı inerttir ve FDM'nin entalpisine katkıda bulunmayıp bunun yerine, karşılık gelen normal parafine kıyasla entalpide bir azalmaya neden olur. Ancak, değişen metal atomlarının farklı koordinasyon geometrilerine dayalı olarak termal davranışta önemli farklılıklar oluşturur (Landi ve Vacatello, 1975). Literatürde bu konuda çeşitli katmanların faz geçiş sıcaklıkları KK-FDM olarak değerlendirilmesi çeşitli yayınlarda incelenmiştir (Busico vd., 1980; C. F. Gao vd., 2014; He vd., 2010; Kang vd., 1993; 104iv d., 1999; Raj vd., 2019).



şekil 3. Organometalik KK-FDM'nin faz geçiş davranışı (Raj vd., 2020)

Ticari KK-FDM'ler

Ticari KK-FDM'ler, şirketler tarafından belirli bir amaç için veya farklı özelliklerde FDM'ler elde etmek için sentezlenen ürünlerdir. Plus Ice PCM Products Ltd şirketi X serisi adı altında erime sıcaklığı 25-180 °C arasında, erime entalpisi 110-275 J/g arasında değişen bir seri katı-katı ticari FDM üretilip satışa sunmuştur (Anonim, 2024).

FDM Seçim Parametreleri

Isıl iletkenlik

Isıl iletkenlik, termal enerji depolaması sırasında şarj ve deşarj olaylarını belirlediği için bir FDM'nin seçiminde önemli bir kriterdir. KK-FDM'ler genellikle KS-FDM'lerle karşılaştırıldığında daha düşük ısı iletkenliklere sahiptir. Literatürde KK-FDM olarak kullanılan çeşitli FDM'lerin ısı iletkenlik değerleri araştırılmıştır. Sari ve ark., bir dizi sentezlenmiş polimerik FDM'nin ısı iletkenliğini incelemiştir. Polistiren-greft-PEG-6000 yapının 0,10 ile 0,13 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ arasında bir ısı iletkenliğe sahip olduğunu, ısı iletkenlik değerinin PEG6000'nin kütle yüklemesinin bağlı olduğunu rapor etmişlerdir (Sari, Alkan, ve Biçer, 2012). Whitman ve ark., organometalik bir KK-FDM olan di-n-hekzil amonyum bromürü karakterize etti ve ısı iletkenlik değerinin 0,12 ile 0,17 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ arasında olduğunu buldu (Whitman vd., 2012). Son ve Morehouse, organik FDM olarak neopentil glikolün güneş enerjisi depolamadaki uygunluğu üzerine deneysel çalışmalar yürüttüler. Polioller genellikle düşük ısı iletkenlik değerlerine sahiptir, neopentil glikolün ısı iletkenlik değeri 0,24 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ve penta gliserinin ısı iletkenlik değeri 0,34 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 'dir. Sayısal analiz yoluyla, istenen izotermal performans için neopentil glikolün ısı

iletkenliğinin en az $1,0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 'e yükseltilmesi gerektiğini belirlediler (Son ve Morehouse, 1991a). Bu nedenle pratikte, ısı transfer oranını etkili bir şekilde artırmak için KK-FDM'de ısı iletkenlik artışı gereklidir.

Literatürde ısı iletkenliğin artırılması için genellikle 2 yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan birincisinde, FDM'de içerisinde yüksek ısı iletkenliğe sahip parçacıkların dağıtılmasıyla FDM kompozitleri oluşturulması yöntemidir (Frusteri vd., 2005; Kibria vd., 2015a, 2015b). İkinci yöntemde ise, malzemenin geometrisinin değiştirilerek termal iletkenliğin artırılmasıdır (İbrahim vd., 2017; Son ve Morehouse, 1991b).

Aşırı Soğuma

Isıtma sırasında, FDM faz geçiş periyodu boyunca ısıyı emer. Ancak, soğutma sırasında, tersine faz geçişi esnasında depolanan ısı ısıtma sırasındakinden çok daha düşük sıcaklıklarda serbest bırakılır. Bu alt soğutma miktarı, malzemenin soğutma/ısıtma oranlarına bağlıdır ancak gerçekçi ısıtma ve soğutma oranlarında, malzemenin minimum miktarda soğuma sergilemesi istenir. Faz geçiş sıcaklıkları arasında oluşan bu sıcaklık farkına aşırı soğuma denilir. KK-FDM'lerde aşırı soğuma miktarı yapıdaki sert segmentin varlığı sebebiyle KS-FDM'ler ile kıyaslandığında daha fazla hissedilir. Organometalik KK-FDM'ler de yine aşırı soğuma davranışı izlenmektedir. Aşırı soğuma davranışı, FDM içine eklenen metal, aktif karbon, alüminyum nitrat nanopartikülleri vb. gibi yüksek termal iletkenliğe sahip çekirdekleştirici maddelerle kompozitler oluşturularak azaltılabilir. Hu ve ark. 2014 yılında yaptıkları çalışmada pentaeritritolün aşırı soğuma davranışını azaltmak için çekirdekleştirici ajan olarak alüminyum nitrür nanopartiküllerini

kullanmışlardır. Çalışmada, daha hızlı soğuma oranları ve aşırı soğuma olmaksızın soğumanın ısıtma döngüsünü geri dönüşümlü olarak takip ettiğini gözlemlemişlerdir (Hu vd., 2014).

Termal ve Kimyasal Kararlılık

Uygulanabilirliğini ve kimyasal kararlılığı, fiziksel TES uygulamalarında uzun vadeli uygulanabilirliğini ve kullanımını belirlemede hayati bir rol oynar. Güneş enerjisi depolama gibi TES sistemlerinde, FDM ömrü boyunca birden fazla şarj ve deşarj döngüsünden geçer. FDM'nin bu döngüsü, termo-fiziksel özelliklerinde bir bozulmaya yol açar. Termal kararlılık, FDM'nin faz geçiş sıcaklığı boyunca tekrar tekrar döngüye sokulduğu bir laboratuvar da hızlandırılmış termal döngü biçiminde test edilebilir. FDM'nin tekrarlanan termal döngüden sonra bile kararlı olduğu söylenir ve termal, kimyasal ve fiziksel kararlılığını korur. Termal özelliklerdeki değişiklik genellikle termal döngüden önce ve sonra faz değişim sıcaklığı ve entalpisindeki değişiklikleri karşılaştırarak bir Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ile doğrulanır. Ayrıca kimyasal kararlılık, termal döngü nedeniyle kimyasal yapıdaki değişiklikleri gösterebilen FTIR'deki değişiklikleri ile de kontrol edilmelidir. Termal döngü sonunda hafif bir bozulma kaçınılmaz olup, uygun sınırlar içindeyse kabul edilebilir (Chen vd., 2015).

Poliol ve Polimerik FDM'lerin gizli entalpi, uzun döngülerden sonra bile dayanacak kadar yüksektir, bağlı entalpi değişimi daha azdır ve FDM uzun vadeli uygulamalar için kullanılabilir. Ancak, organometalik FDM'ler üzerinde termal kararlılık konusunda yeterince veri bulunmamaktadır. Metal tuzu substratının varlığı doğası gereği daha fazla kararlılık sağlasa da

nispeten düşük entalpi değerleri TES uygulamaları için bir dezavantaj olabilir.

Termal Bozunabilirlik

Termogravimetrik Analiz (TGA), artan sıcaklıkla ktle yüzdesindeki değişimi ölçen ve bir FDM'nin bozunma sıcaklığını ölçmek için kullanılan bir testtir. Çoğu FDM'nin bozunma sıcaklığı, faz geçişinden veya çalışma sıcaklığından çok daha yüksek olup düşük sıcaklık uygulamalarında endişe konusu olmaz. Çoğu polialkoln ayrışma sıcaklıkları çok yüksek değildir. Neopentil glikol için maksimum kullanılabilir sıcaklık 150  C'de ve pentaeritritol için 250  C'de görülür [(Praveen ve Suresh, 2018a; Venkitaraj, Suresh, ve Venugopal, 2018a). Çoğu polimerik KK-FDM için bozunma sıcaklığı yaklaşık 200–300  C'dir; ancak kullanılan 'sert' birimin polimer oranında arttırılmasıyla 400  C'ye varan sıcaklıklara çıkılabilir (Sari, Alkan, & Lafi, 2012; Sari et al., 2011).Ancak, organometalik malzemelerin bozunma sıcaklıkları ile ilgili yeterli sayıda araştırma bulunmamaktadır.

Toksisite

Toksisite, bir kimyasal maddenin veya belirli bir element karışımının canlı organizmalara zarar verme derecesidir. Farklı FDM'ler üzerinde yapılan birçok araştırma sonucunda, bazı organometalik ve organik KK-FDM'lerin belirli uygulamalar için toksik olmadığı bulunmuştur. Organik KK-FDM'ler düşük toksisiteye sahipken, bazı polimerik FDM'ler çok sayıda reaktif zincire sahip yapıları ve sentezde kullanılan izosiyanat nedeniyle minimum toksisite seviyesine sahiptir. Civa bazlı katmanlı perovskitlerin toksik olma dezavantajı olduğundan pratik

uygulamalar için uygun değildirler. Manganez bazlı katmanlı perovskitler, belirli bir faz geçiş sıcaklığı için en yüksek entalpilerle sahip olmalarına rağmen toksik olmaları nedeniyle uygulamaları kısıtlıdır. Kobalt kullanan katmanlı perovskitlerde yüksek faz geçiş sıcaklıklarının yanı sıra yüksek entalpiler olup toksisiteyi yine bir dezavantajdır (W. Gao vd., 2007). Bu nedenle, KK-FDM'lerin TES uygulamalarının ölçeklenebilir olması için tehlike seviyesi konusunda çok yoğun araştırmalara ihtiyaç duyulur ve çevre dostu olmadıkları için pratik uygulama da toksisiteye dayalı seçim son derece önemlidir.

Yangın geciktirici

KK-FDM'lerin yangın geciktirici olması ve yakıt görevi görerek yangını daha da kötüleştirmemesi arzu edilir. Ayrıca, yangından kaynaklanan hacimsel ve kimyasal değişimler ihmal edilebilir düzeyde olmalıdır. Çoğunlukla, polimerik ve organik malzemeler zayıf yangını geciktirme özelliğine sahip olup çoğu hidrokarbon yakıtlara yapısal olarak benzerdir. Literatürde KK-FDM'leri yanmazlık özelliğini geliştirmek için çalışmalar yürütülmektedir. Chattopadhyay ve Webster, poliüretanların alev geciktiriciliği üzerine kapsamlı bir inceleme yürütmüş ve alev geciktirici katkı maddeleri olarak melamin ve genişletilmiş grafit önermiştir (Chattopadhyay ve Webster, 2009). Yangın geciktirici, herhangi bir uygulamadan önce dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. Bu nedenle, yangın geciktirici KK-FDM ve katkı maddelerini seçmek TES uygulamaları için önemlidir.

KK-FDM Uygulamaları

KK-FDM'deki son gelişmeler bu malzemelerin performanslarını iyileştirmiştir ve KK-FDM'nin başarıyla kullanılabileceği çok sayıda uygulama vardır. Öncelikle FDM seçiminde dikkat edilecek unsurlar taranmalı, yüksek faz geçiş entalpisine ve uygun faz geçiş sıcaklığına sahip FDM seçilmelidir. Ayrıca, termal iletkenlik değeri ne kadar büyükse, şarj/deşarj işlemi o kadar hızlı olur bu sebeple termal iletkenlik değer ayrıca tartışılmalıdır. Bunların dışında, özgül ısı kapasitesi ve aşırı soğuma gibi termal özellikler, faz değişiminin başlaması için gereken süreyi belirlediği için TES uygulamasına geçilmeden belirlenmelidir. Termal ve kimyasal kararlılık, bir FDM'nin uzun vadeli döngüsel çalışma için uygunluğunu belirler. TES sistemini tasarlarken ve malzeme uyumluluğuna karar verirken kimyasal özellikler de dikkate alınmalıdır. Son olarak, maliyeti en aza indirmek için FDM'nin yüksek bulunabilirliği ve düşük maliyeti gibi ekonomik unsurlar dikkatlice belirlenmelidir.

Yukarıda bahsi geçen tüm parametrelerin belirlenmesinin ardından FDM birçok alanda kullanılmaktadır. Bu alanlar aşağıda verilen başlıklar altında özetlenmiştir.

Güneş Enerjisinden Termal Depolama

Güneşin termal enerji depolama sistemlerinde kullanılabilmesi için güneş enerjisinin kesintili doğası sebebiyle, enerjinin depolanmasını gerektirirler. FDM tabanlı TES sistemleri, termal enerjinin şarj edilmesi ve boşaltılması arasındaki daha küçük sıcaklık dalgalanmaları nedeniyle geleneksel sistemlere göre çok daha düşük hacimler kaplar ve daha yüksek verimliliğe sahiptir. Bu

sebeple FDM'ler güneşten termal enerji depo etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Güneş enerjisinin bir FDM ısı eşanjörü tankında depolandığı duyulur ısı-gizli ısı depolama ünitelerinin hibrit bir ünite olarak güneş destekli ısı pompalarıyla birlikte kullanıldığı çalışmada, bulutlu koşullar gibi güneş ışınımının yetersiz olduğu zamanlarda KK-FDM güç sağlamak için kullanılmıştır. (Youssef vd., 2017). Zhou ve ark. yürüttükleri çalışmada, ışıktan termal dönüşüm için yerinde indirgenmiş grafen oksit levhalarla çapraz bağlanmış poliüretan bazlı KK-FDM kullandılar. Sonuçlar verimliliği yüksek, 100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kararlı ve güneş enerjisi toplayıcı sistem gibi enerji depolama aygıtları için uygulanabilen iyileştirilmiş termal kararlılık ve termal tekrarlanabilirlik sağlayan KK-FDM üretebildiklerini doğrulamıştır (Zhou vd., 2017, 2018).

Soğuk depolama

Soğuk depolama uygulaması, elektronik ve biyoteknoloji endüstrilerinde kullanılan kriyojenik kontrolörleri içeren sistemlerdir. Soğuk depolama uygulamalarında kullanılan KK-FDM'ler buzdolapları, soğuk depolama elektrik kesintileri vb. uygulamalar için yardımcı bir işlevsel ünite olarak kullanılabilir. Ayrıca, dondurulmuş gıdaları, içecekleri, paketlenmiş gıdaları, dondurmaları ve çiçekleri saklamak için de kullanılabilir. KK-FDM panelleri, gıdanın nakliye sırasında veya elektrik olmadan uzun süreli depolama sırasında bozulmasını önlemek için soğutmalı bir araca takılabilir. Bazen ısıyı depolamak yerine, çevre sıcaklığıyla ısıyı serbest bırakmak için de kullanılabilir. Ticarileştirme açısından bakıldığında, catering ve tıbbi amaçlı taşıma sistemleri için önemli

iyileştirmeler sağlayabilir ve sıcaklığa duyarlı malzemelerin taşınmasına olanak sağlar.

Elektronik Cihazların Termal Yönetimi

KK-FDM'ler genellikle elektronik cihazların açma/kapama veya değişken görev döngülerinde kullanılırlar. Tabletler ve akıllı telefonlar gibi cihazlar, kullanıcı etkinliğine bağlı olarak günün çoğunda düşük güç bekleme modunda çalışır. Bu çalışma süreleri boyunca, KK-FDM'ler enerji emer, sabit bir çalışma sıcaklığını koruyarak faz geçişine uğrar ve ardından tepe döngüsü sona erdiğinde depolanan ısıyı dağıtır. Bu geçiş döngüleri, KK-FDM'nin ısını ortama yaymak ve bir sonraki döngüye hazırlamak için yeterli zamana sahip olup yaygın kullanım aralıklarıyla eşleşmelidir. Praveen ve ark. tarafından 2018 yılında yürütülen çalışmada yapılan, şarj/deşarj döngüsü sırasında CuO nanopartikülleri katkılı neopentil glikol-pentaeritritol KK-FDM'nin ısı transfer performansı üzerine deneysel bir çalışmada, elektronik sistemlerin ısı emici tabanlı soğutulmasında olası kullanım sağladığı rapor edilmiştir. CuO nanopartiküllerinin eklenmesi, ısı emicinin elektronik sistemi soğutması için gereken geri kazanım süresini azaltmıştır (Praveen ve Suresh, 2018b). KK-FDM'lerin elektronik sistemlerde kullanımı maliyet açısından artışa sebep olduğu için dünya genelinde yalnızca birkaç elektronik şirket kaliteli FDM ile ilgilenmektedir.

Tekstil Uygulamaları

Mondal ve Erkan tarafından yürütülen bağımsız bir çalışmada, insan konforu sıcaklık aralığında faz geçişinde daha iyi termal düzenleme performansı gösteren KK-FDM ile işlenmiş kumaşların önemi tartışılmıştır. Çalışmada, KK-FDM ile işlenmiş

kumaşları battaniye, yalıtım, koruyucu giysiler vb. dahil olmak üzere çeşitli ürünler oluşturmak için uygun hale getirmişlerdir (Erkan, 2004; Mondal, 2008).

KK-FDM ayrıca sporcuların uzun bir antrenman seansından sonra bile rahat hissetmeleri için termal denge gerektiren spor ekipmanlarında da kullanılabilir. Dağcılık botları, kayak botları, yarış arabası sürücüsü botları vb. gibi aksesuarlarda, genellikle giyen kişinin başında, vücudunda, ellerinde ve ayaklarında ani sıcaklık dalgalanmalarını önlemek için ısıyı emerek, depolayarak, yeniden dağıtarak ve serbest bırakarak gerekli konforu sağlamak için kullanılmaktadır. KK-FDM içeren tekstiller, çevresel sıcaklıktaki değişikliklere tepki vererek gizli ısıyı emip serbest bırakmaları ve bir ısı düzenleyici etki sağlamaları nedeniyle akıllı malzemeler kabul edilir. Bu sebeple, sınırlı hacim genişlemesi, yüksek termal kararlılık ve geri dönüşümlülüğe mükemmel bir geçiş niteliğine sahip KK-FDM'ler tekstil uygulamalarında ısı depolama için uygundur.

Tıbbi uygulamalar

KK-FDM'lerin neredeyse sabit sıcaklıkları koruyan faz geçiş mekanizması onları çeşitli biyomedikal uygulamalar için çekici hale getirir. Düşük sıcaklıklı KK-FDM'ler, soğutma sistemlerinin yokluğunda veya arızalı olduğunda bile sıcaklıkları koruyabildikleri için sıcaklığa duyarlı ilaçların ve aşıların taşınmasında kullanılır. Cilt tedavisi için termal terapide ve bandaj şeklinde ortopedik rahatsızlıkların fizyoterapisinde de KK-FDM'ler kullanılmıştır (Shukla vd., 2015). KK-FDM ile işlenmiş kumaşlar vücut sıcaklığını koruyabilir ve hipotermi vakaları için tıbbi giysilerde veya yoğun bakım ünitesinde kullanılabilir. PEG ile işlenmiş tekstillerin iyi antibakteriyel özellikler gerektiren uygulamalarda kullanıldığı

bilinmektedir (Mondal, 2008). Bununla birlikte, KK-FDM'nin doğada katı-katı davranışı, geleneksel KS-FDM'ye kıyasla faz geçişinden sonra sızdırmazlığı ile avantaj sağlar.

Otomobiller

KK-FDM, fazla motor ısını depolamak veya egzoz gazından atık ısıyı geri kazanmak için kullanılabilir. Polioller, KS-FDM'lere benzer entalpiye sahip ancak düşük termal iletkenlikleri dolayısıyla bu özelliğin geliştirilmesine ihtiyaç duyarlar. Poliollerdeki zayıf termal iletkenlik iletken nanopartiküllerin eklenmesiyle artırılabilir. Bu malzemeler otomobillerde ısı depolama amaçlı kullanılmaktadır. Venkitaraj ve ark, Al_2O_3 nanopartikül eklenen pentaeritritolün içten yanmalı motor egzozundan ısı geri kazanımı uygulamaları için termal enerji depolama/salınım performansını analiz etmişlerdir. Çalışmada, artan şarj kapasitesinin yanı sıra, uzun süreli kullanıma olanak tanıyan KK-FDM'nin termal kararlılığında da bir artış gözlemlenmiştir (Venkitaraj, Suresh, ve Venugopal, 2018b).

Bina uygulamaları

KK-FDM'ler net sıfır bina hedefine ulaşmak ve enerji tasarrufunu artırmak için bina duvarlarının sıcaklığını düzenlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. KK-FDM'ler iç mekân yaşam alanına termal atalet sunar, dolayısıyla canlı türlerine termal konfor sağlar. Ayrıca dış mekân yapı malzemelerinde de kullanılırlar, böylece gün boyunca ısı enerjisini depolar ve iç mekânı ısıtmasını önler, gece boyunca da aldığı ısıyı yavaşça serbest bırakarak gece de termal konfor sağlamaya devam ederler.

Venkitaraj ve diğerleri, neopentil glikolün özelliklerini geliştirmek için %0,1 kütle kesri CuO nanopartikülleri ekleyerek

bina soğutma uygulamaları için makro paketlenmiş neopentil glikolün kullanımını incelediler. Modellenmiş bir binada makro paketlenmiş FDM üzerinde incelenen ısı transferi performansı, CuO nanopartiküllerinin eklenmesinin makro paketlenmiş neopentil glikolün tepki süresini azalttığını ve dolayısıyla termal performansta genel bir artışa yol açtığını göstermiştir (Venkitaraj, Suresh, Praveen, vd., 2018). FDM bazlı alçıpanlar ve mikro kapsüllenmiş FDM bazlı beton bloklar gibi malzemeler bina yapımında kullanılmaktadır (Barrio vd., 1992). Bu K-K FDM'ler genişlemediğinden, termal konfor için betonla karıştırılarak ve yalıtım malzemesiyle karıştırılarak panellere sızıntı sınırlanabilir ve bina uygulamasında yardımcı sistem olarak kullanılabilir. Pratik açıdan, bina yapısına entegre edilmiş çeşitli KK-FDM'lerin sistematik bir taramasına ihtiyaç vardır, özellikle gerçek kullanım koşullarında. KK-FDM'nin gelecekteki pazarı, kullanımındaki zorlukları karşılamak için akıllı mühendislik çözümleriyle inşaat ve bina faaliyetlerinde umut verici görülmektedir.

Uzay aracı termal sistemleri

Konveksiyon tabanlı ısı emicilerin kullanımı uzay uygulamalarında mümkün değildir. Ayrıca, uzaydaki termal ortam çok serttir ve sıcaklıklar hızla dalgalanır. Uydu aviyonik sisteminin aşırı ısıdan korunması ve ayrıca onları çalışmaz hale getiren sıg sıcaklıklara düşmesinin önlenmesi önemlidir. Isıdan koruma, çift duvarlı vakumlu yalıtım panelleri gibi yalıtım kullanılarak sağlanabilirken, sıcaklıklar çok düştüğünde ayrı ısıtıcılar sağlanmalıdır. Yerçekimi etkisinin sıvı hareketini kısıtlaması ve elektronik bileşenlerin güvenli sıcaklık sınırları altında tutulmasının gerekli olduğu KS-FDM yerine KK-FDM kullanımı daha uygundur.

KK-FDM'lerin uzay uygulamalarında kullanımı bu sebeple maliyet ve kütle artışında da azalmaya neden olur.

NASA, Mars gezginlerindeki pil sıcaklıklarını düzenlemek için termal depolama kapsülleri formunda parafin mumu, dodekan ve heksadekan kullanmıştır. Sen ve ark. (Sen vd., t.y.), plaka-kanat ve pim-kanat yapılandırmalarının alüminyum ısı emicilerinde neopentil glikol kullanmış ve neopentil glikol ile doldurulmuş plaka-kanat için 1,4 ve pim-kanat ısı emiciler için 2,6 kütle azaltma faktörü elde etmişlerdir. Ayrıca KK-FDM ısı emicilerinin radar gibi güç yoğun sistemlerde kullanım uygunluğunu önermişlerdir. Yerçekiminin olmaması nedeniyle KS sistemlerindeki doğal taşınımın etkilendiği uzay uygulamalarında KK-FDM daha uygundur, ancak araştırma eksikliği nedeniyle uygulanabilirliği sınırlıdır.

SONUÇLAR VE KK-FDM'LERİ İLE YAPILARIN TERMAL ENERJİ DEPOLAMA UYGULAMALARININ GELECEĞİ

KK-FDM, termal enerji depolama teknolojisinde muazzam alana sahiptir. Geçtiğimiz on yıldan beri, KK-FDM tabanlı ısı depolama sistemi üzerindeki araştırma yönü, evsel ve endüstriyel uygulamalarda artmaktadır. Bu arada, fosil yakıtların dayattığı çevresel tehditler, çevre dostu enerji depolama sistemine yönelik endişe verici ihtiyacı artırmıştır. Günümüzde teknoloji, yenilenebilir enerji kullanımına doğru yönelmiştir ve yeni bir sistem sınıfının geliştirilmesi ve bunların FDM'lerle birleştirilmesi farklı uygulamalarda kullanımına olanak vermektedir.

Son zamanlarda araştırmalar KK-FDM'lerin termal özelliklerini ve enerji depolama sistemindeki uygulamalarını

iyileştirmeye odaklanmıştır. Bu alanda kompozit KK-FDM'lerin daha iyi şarj/deşarj sürelerine sahip olduğundan gelecek uygulamalarda daha fazla yer alması beklenmektedir. Kompozit KK-FDM'lerin yalnızca termal iletkenliği ve ısı transfer oranı daha iyi olmakla kalmayıp aynı zamanda aşırı soğuma etkisini azaltmış malzemelerdir. Ancak KK-FDM'lerin TES sistemlerinde kullanılması için gizli ısı depolama kapasitesinin artırılması gerekmektedir. KK-FDM'lerinin kullanımlarını kısıtlayan handikapların birçoğu nanoparçacıkların eklenmesi ile azaltılmaktadır. Eklenen bu parçacıklarda malzemenin enerji depolama kapasitesini azaltmaktadır. Araştırmacılar, katkı maddelerinin optimum bir şekilde karıştırılması, stabilize edilmesi konusundaki tutarsızlığı düzenlemelidir.

KK-FDM'lerinin TES sistemlerinde kullanımı için yaygın geciktirici özelliklerinin de geliştirilmesi gerekmektedir.

Ekonomik analiz, maliyet ve uygulanabilirlik laboratuvar ölçeğinden ticari uygulamaya kadar dikkatle hesaplanmalıdır. KK-FDM'nin kapsamlı ekonomik analizi mevcut/önerilen literatürde bildirilmemiştir ve küresel kabul için bu durumun halen araştırılması gerekmektedir.

KK-FDM özelliklerini sentez yöntemleriyle uyarlamak, kısıtlı bir matriste ikili veya üçüncül, hibrit karışımlar oluşturmak, kontrollü faz geçişi, yüksek gizli ısı, aşırı soğuma olmayan FDM'ler oluşturmak için hala zorluklar ortaya koymaktadır. Enerji taleplerini karşılamak için sağlanan yeni bir çevre dostu KK-FDM kompoziti geliştirmekle TES sistemlerindeki KK-FDM'lerin eksiklikler azaltılabilir.

KK-FDM'nin faydası, özelliklerinin üstünlüğü ve yüksek nitelikleri hakkında farkındalık eksikliği nedeniyle, KK-FDM'nin kullanımı birkaç belirli uygulama ile sınırlıdır. Mevcut sistemi gelişmiş ekipman kullanarak iyileştirmek, enerji sisteminde daha iyi bir faz geçiş mekanizmasına olan ihtiyacı teşvik edebilir. Bu çalışmalar araştırmacıları, KK-FDM'leri uygulayarak TES sistemini modellemek ve pratik veri güvenilirliğini sağlamak için gerekli ön koşul adımlarını doğru bir şekilde geliştirmeye teşvik edecektir.

Kaynaklar

Anonim, 2024, Company–Plus Ice PCM Products Ltd.

<http://www.pcmproducts.net/files/PlusICE%20Range-2013.pdf>.

Alkan, C., Ensari, Ö. F., Kahraman, D. 2012. "Poly(2-alkyloyloxyethylacrylate) and poly(2-alkyloyloxyethylacrylate-co-methylacrylate) comblike polymers as novel phase-change materials for thermal energy storage". Journal of Applied Polymer Science.

Barrio, M., Font, J., López, D. O., Muntasell, J., Tamarit, J. L. 1992. "Floor radiant system with heat storage by a solid-solid phase transition material". Solar Energy Materials and Solar Cells, 27(2), 127-133.

Benson, D. K., Burrows, R. W., Webb, J. D. 1986. "Solid state phase transitions in pentaerythritol and related polyhydric alcohols". Solar Energy Materials, 13(2), 133-152.

Busico, V., Carfagna, C., Salerno, V., Vacatello, M., Fittipaldi, F. 1980. "The layer perovskites as thermal energy storage systems". Solar Energy, 24(6), 575-579.

Chattopadhyay, D. K., Webster, D. C. 2009. "Thermal stability and flame retardancy of polyurethanes". Progress in Polymer Science, 34(10), 1068-1133.

Chen, C., Liu, W., Wang, Z., Peng, K., Pan, W., Xie, Q. 2015. "Novel form stable phase change materials based on the composites

of polyethylene glycol/polymeric solid-solid phase change material". *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 134, 80-88.

Erkan, G. 2004. "Enhancing The Thermal Properties of Textiles With Phase Change Materials". *Research Journal of Textile and Apparel*, 8(2), 57-64.

Feng, H., Liu, X., He, S., Wu, K., Zhang, J. 2000. "Studies on solid-solid phase transitions of polyols by infrared spectroscopy". *Thermochimica Acta*, 348(1-2), 175-179.

Frusteri, F., Leonardi, V., Vasta, S., Restuccia, G. 2005. "Thermal conductivity measurement of a PCM based storage system containing carbon fibers". *Applied Thermal Engineering*, 25(11-12), 1623-1633.

Gao, C. F., Wang, L. P., Li, Q. F., Wang, C., Nan, Z. D., Lan, X. Z. 2014. "Tuning thermal properties of latent heat storage material through confinement in porous media: The case of $(1-\text{CnH}_{2n+1}\text{NH}_3)_2\text{ZnCl}_4$ ($n=10$ and 12)". *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 128, 221-230.

Gao, W., Lin, W., Liu, T., Xia, C. 2007. "An Experimental Study on the Heat Storage Performances of Polyalcohols NPG, TAM, PE, and AMPD and their Mixtures as Solid-Solid Phase-Change Materials for Solar Energy Applications". *International Journal of Green Energy*, 4(3), 301-311.

He, D. H., Di, Y. Y., Yao, Y., Liu, Y. P., Dan, W. Y. 2010. "Crystal Structure, Low-Temperature Heat Capacities, and Thermodynamic Properties of Bis(dodecylammonium)

Tetrachlorocuprate ($\text{C}_{12}\text{H}_{28}\text{N})_2\text{CuCl}_4(\text{s})$ ". Journal of Chemical and Engineering Data, 55(12), 5739-5744.

Hu, P., Zhao, P. P., Jin, Y., Chen, Z. S. 2014. "Experimental study on solid–solid phase change properties of pentaerythritol (PE)/nano-AlN composite for thermal storage". Solar Energy, 102, 91-97.

Ibrahim, N. I., Al-Sulaiman, F. A., Rahman, S., Yilbas, B. S., Sahin, A. Z. 2017. "Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 74, 26-50.

Kang, J. K., Choy, J. H., Rey-Lafon, M. 1993. "Phase transition behavior in the perovskite-type layer compound ($\text{n-C}_{12}\text{H}_{25}\text{NH}_3$) $_2\text{CuCl}_4$ ". Journal of Physics and Chemistry of Solids, 54(11), 1567-1577.

Kibria, M. A., Anisur, M. R., Mahfuz, M. H., Saidur, R., Metselaar, I. H. S. C. 2015a. "A review on thermophysical properties of nanoparticle dispersed phase change materials". Energy Conversion and Management, 95, 69-89.

Kibria, M. A., Anisur, M. R., Mahfuz, M. H., Saidur, R., Metselaar, I. H. S. C. 2015b. "A review on thermophysical properties of nanoparticle dispersed phase change materials". Energy Conversion and Management, 95, 69-89.

Landi, E., Vacatello, M. 1975. "Metal-dependent thermal behaviour $\text{Ln}(\text{n-CnH}_{2\text{n}+1}\text{NH}_3)_2\text{MCl}_4$ ". Thermochimica Acta, 13(4), 441-447.

Li, W., Zhang, D., Zhang, T., Wang, T., Ruan, D., Xing, D., Li, H. 1999. "Study of solid–solid phase change of (n-CnH_{2n+1}NH₃)₂MeCl₄ for thermal energy storage". *Thermochimica Acta*, 326(1-2), 183-186.

Mondal, S. 2008. "Phase change materials for smart textiles – An overview". *Applied Thermal Engineering*, 28(11-12), 1536-1550.

Pielichowski, K., Flejtuch, K. 2003. "Differential Scanning Calorimetry Study of Blends of Poly(ethylene glycol) with Selected Fatty Acids". *Macromolecular Materials and Engineering*, 288(3), 259-264.

Praveen, B., Suresh, S. 2018a. "Experimental study on heat transfer performance of neopentyl glycol/CuO composite solid-solid PCM in TES based heat sink". *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(5), 1086-1094.

Praveen, B., Suresh, S. 2018b. "Experimental study on heat transfer performance of neopentyl glycol/CuO composite solid-solid PCM in TES based heat sink". *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(5), 1086-1094.

Raj, C. R., Suresh, S., Bhavsar, R. R., Singh, V. K. 2020. "Recent developments in thermo-physical property enhancement and applications of solid solid phase change materials: A review". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139(5), 3023-3049.

Raj, C. R., Suresh, S., Bhavsar, R. R., Singh, V. K., Reddy, A. S., Upadhyay, A. 2019. "Manganese-based layered perovskite solid–

solid phase change material: Synthesis, characterization and thermal stability study". *Mechanics of Materials*, 135, 88-97.

Sari, A., Alkan, C., Biçer, A. 2012. "Synthesis and thermal properties of polystyrene-graft-PEG copolymers as new kinds of solid-solid phase change materials for thermal energy storage". *Materials Chemistry and Physics*, 133(1), 87-94.

Sari, A., Alkan, C., Biçer, A., Karaipekli, A. 2011. "Synthesis and thermal energy storage characteristics of polystyrene-graft-palmitic acid copolymers as solid-solid phase change materials". *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(12), 3195-3201.

Sari, A., Alkan, C., Lafçi, Ö. 2012. "Synthesis and thermal properties of poly(styrene-co-allyl alcohol)-graft-stearic acid copolymers as novel solid-solid PCMs for thermal energy storage". *Solar Energy*, 86(9), 2282-2292.

Sen, V., Jaiswal, J., Nandi, A., ... A. A.-D. S., 2018, undefined. t.y. "Passive Thermal Management of Launch Vehicle Systems using Phase Changing Materials.". academia.eduVK Sen, J Jaiswal, A Nandi, AV Aliyas, A PillaiDefence Science Journal, 2018•academia.edu. Geliş tarihi gönderen
<https://www.academia.edu/download/114332861/62111.pdf>

Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., Buddhi, D. 2009. "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318-345.

Shukla, A., Sharma, A., Shukla, M., Chen, C. R. 2015. "Development of thermal energy storage materials for biomedical

applications". *Journal of Medical Engineering & Technology*, 39(6), 363-368.

Singh, H., Talekar, A., Chien, W. M., Shi, R., Chandra, D., Mishra, A., ... Nelson, D. J. 2015. "Continuous solid-state phase transitions in energy storage materials with orientational disorder – Computational and experimental approach". *Energy*, 91, 334-349.

Son, C. H., Morehouse, J. H. 1991a. "An Experimental Investigation of Solid-State Phase-Change Materials for Solar Thermal Storage". *Journal of Solar Energy Engineering*, 113(4), 244-249.

Son, C. H., Morehouse, J. H. 1991b. "An Experimental Investigation of Solid-State Phase-Change Materials for Solar Thermal Storage". *Journal of Solar Energy Engineering*, 113(4), 244-249.

Venkataraj, K. P., Suresh, S., Praveen, B., Nair, S. C. 2018. "Experimental heat transfer analysis of macro packed neopentylglycol with CuO nano additives for building cooling applications". *Journal of Energy Storage*, 17, 1-10.

Venkataraj, K. P., Suresh, S., Venugopal, A. 2018a. "Experimental study on the thermal performance of nano enhanced pentaerythritol in IC engine exhaust heat recovery application". *Applied Thermal Engineering*, 137, 461-474.

Venkataraj, K. P., Suresh, S., Venugopal, A. 2018b. "Experimental study on the thermal performance of nano enhanced pentaerythritol in IC engine exhaust heat recovery application". *Applied Thermal Engineering*, 137, 461-474.

Whitman, C. A., Johnson, M. B., White, M. A. 2012. "Characterization of thermal performance of a solid–solid phase change material, di-n-hexylammonium bromide, for potential integration in building materials". *Thermochimica Acta*, 531, 54-59.

Youssef, W., Ge, Y. T., Tassou, S. A. 2017. "Effects of latent heat storage and controls on stability and performance of a solar assisted heat pump system for domestic hot water production". *Solar Energy*, 150, 394-407.

Zhang, H., Baeyens, J., Cáceres, G., Degreè, J., Lv, Y. 2016. "Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects". *Progress in Energy and Combustion Science*, 53, 1-40.

Zhou, Y., Liu, X., Sheng, D., Lin, C., Ji, F., Dong, L., ... Yang, Y. 2017. "Graphene oxide/polyurethane-based solid–solid phase change materials with enhanced mechanical properties". *Thermochimica Acta*, 658, 38-46.

Zhou, Y., Liu, X., Sheng, D., Lin, C., Ji, F., Dong, L., ... Yang, Y. 2018. "Polyurethane-based solid-solid phase change materials with in situ reduced graphene oxide for light-thermal energy conversion and storage". *Chemical Engineering Journal*, 338, 117-125.